
ALEGRO


***Aufbau eines lokalen maritimen Ergänzungssystems zur
Unterstützung hochpräziser Galileo-Anwendungen und –
Dienste im Forschungshafen Rostock***



Technical Note

Measuring Campaign 30.01.-02.02.2007

„Rohdatenqualität und -Verfügbarkeit“

Author:	Dr. E. Engler	11.07.2007	
Proved	T. Noack	13.07.2007	
by WP leader:			
by Project leader:	i.V. D. Klähn		
Version:	2.0		
Document-ID:	ALEGRO-TN-MK1-V01-07- Rohdatenqualität(V2).doc		
Pages:	140		
			Institute of Communications and Navigation

Änderungsbericht:

Version	Datum	Seiten	Status	Gez. APL	Gez. PL
1.0	13.04.2007	131	Issue 1		
2.0	16.07.2007	133	Issue 2 (Überarbeitung Kommentare), Ergänzung Fig. 4-8, Fig. 4-9 und Fig. 4-15; Ergänzung Abschnitt 6.3 und Anlage D		

Inhalt

1 Einführung.....	14
2 Datenbasis.....	15
2.1 Referenzstation.....	15
2.2 Forschungsschiff „Prof. A. Penck“	15
3 Datenverfügbarkeit im RINEX-File	16
3.1 Referenzstation.....	17
3.2 Forschungsschiff „Prof. A. Penck“	18
3.3 Konstellationsabhängigkeit.....	21
4 Phasenqualität	27
4.1 Cycle Slips	27
4.1.1 Anzahl von Cycle Slips.....	27
4.1.2 Cycle Slips im Zeit- und Satellitenbezug.....	30
4.1.3 Cycle Slips in Relation zum CSD-Trackingprotokoll	34
4.2 Rauschen der Trägerphasen	45
4.2.1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Phasenrauschens.....	45
4.2.2 Standardabweichung des Phasenrauschens pro Minute im Zeitbezug	54
4.2.3 Zusammenhang zwischen L1- und L2-Phasenrauschen	61
5 Signal-Rausch-Verhältnis (SNR).....	66
5.1 Messgenauigkeit des SNR	66
5.2 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR für L1-Messungen	68
5.3 Standardabweichung des SNR pro Minute als Funktion der Zeit.....	75
5.4 Zusammenhang zwischen SNR und Phasenrauschen	89
6 Mehrwegeeffekte.....	94
6.1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der geschätzten Mehrwegefehler	94
6.2 Erhöhte Mehrwegefehler im Zeit- und Satellitenbezug.....	105
6.3 Mehrwegefehler im räumlichen Bezug	109
7 Zusammenfassung	110
8 Referenzen	113
9 Anlage A: Genutzte Software zur Signalanalyse und Ergebnisse.....	114
9.1 CSD-Prozessor	114
9.1.1 Konfiguration.....	114

9.1.2	Eingangsdaten des CSD	115
9.1.3	Ausgangsdaten des CSD	115
9.2	AMP-Prozessor	118
9.3	CSD-Analysator	119
9.3.1	Konfiguration	119
9.3.2	Eingangsdaten des CSD-Analysators	121
9.3.3	Ausgangsdaten des CSD-Analysators	121
10	Anlage B: Nominalverhalten zwischen 2 Messgrößen	125
11	Anlage C: Algorithmen des „Carrier Smoothing“-Verfahrens	126
11.1	Implementierung des trägerautonomen „Carrier Smoothing“	127
11.2	Implementierung des zweifrequenzbasierten „Carrier Smoothing“	131
12	Anlage D: Mehrwegefehler im räumlichen Bezug	135
12.1	Referenzstation	135
12.2	ROVER	138

Tabellen

Tab. 2-1	Datenbasis Referenzstation	15
Tab. 2-2	Datenbasis Forschungsschiff „Prof. A. Penck“	16
Tab. 3-1	Anzahl von Ereignissen ohne Datenaufzeichnung an der Referenzstation klassifiziert nach ihrer Dauer	17
Tab. 3-2	Ereignisse ohne Datenaufzeichnung an den ROVER(n).....	21
Tab. 4-1	Anzahl detektierter Cycle Slips (L1 – L2)	28
Tab. 4-2	Anzahl detektierter Cycle Slips für GPS (L1 – L2).....	28
Tab. 4-3	Anzahl detektierter Cycle Slips für GLONASS (L1 – L2).....	28
Tab. 9-1	Musterformat für 1D-Histogramme.....	122
Tab. 9-2	Musterformat für Wertebereichsangaben	124
Tab. 11-1	Spezifikation der Steuergrößen für „Carrier Smoothing“ für die Einfrequenzprozessierung..	127
Tab. 11-2	Zustandskombinationen der eingehenden Rohdaten für den Glättungsprozess	127
Tab. 11-3	Ausgabewerte für „Carrier Smoothing“ für die Einfrequenzprozessierung	131
Tab. 11-4	Zustandskombinationen bei der Generierung der STEC aus Ranges.....	132
Tab. 11-5	Zustandskombinationen bei der Generierung der STEC aus Phasen.....	133
Tab. 11-6	Ausgabewerte für „Carrier Smoothing“ für die Zweifrequenzprozessierung.....	134

Abbildungen

Fig. 3-1	Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der der Referenzstation	17
Fig. 3-2	Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der Referenzstation (Rover – 30.01.2007)	19
Fig. 3-3	Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der der Referenzstation (Rover – 31.01.2007)	19
Fig. 3-4	Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der der Referenzstation (Rover – 01.02.2007)	20
Fig. 3-5	Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der der Referenzstation (Rover – 02.02.2007)	20
Fig. 3-6	Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (30.01.2007)	22
Fig. 3-7	Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (31.01.2007)	23
Fig. 3-8	Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (01.02.2007)	24
Fig. 3-9	Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (02.02.2007)	25
Fig. 4-1	Anzahl von Cycle Slips des GNSS und GRTK für eine Zeitauflösung von 0.1 s.	29
Fig. 4-2	Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 30.01.2007	31
Fig. 4-3	Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 31.01.2007	32
Fig. 4-4	Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 01.02.2007	32
Fig. 4-5	Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 02.02.2007	33
Fig. 4-6	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für GBAS-Empfänger (GPS L1)	34
Fig. 4-7	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für GBAS-Empfänger (GLONASS L1)	35
Fig. 4-8	Phasenrauschen und Statusflag für PRN 16 an der Referenzstation	36
Fig. 4-9	Phasenrauschen und Statusflag für PRN 28 an der Referenzstation	37
Fig. 4-10	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 30.01.2007)	38
Fig. 4-11	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 30.01.2007)	38
Fig. 4-12	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 31.01.2007)	39
Fig. 4-13	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 31.01.2007)	40
Fig. 4-14	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 01.02.2007)	40
Fig. 4-15	Phasenrauschen und Statusflag für PRN 19 an der Referenzstation und den ROVER(n) am 01.02.2007	41
Fig. 4-16	Phasenrauschen und Statusflag für PRN 23 an der Referenzstation und den ROVER(n) am 01.02.2007	42
Fig. 4-17	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 01.02.2007)	43
Fig. 4-18	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 02.02.2007)	43
Fig. 4-19	Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 02.02.2007)	44
Fig. 4-20	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschen an der Referenzstation sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches	45

Fig. 4-21	Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches	46
Fig. 4-22	Unterschiede der bestimmten Standardabweichungen des Phasenrauschens an Folgetagen in Relation zu Unterschieden in der ausgewerteten Datenbasis.....	46
Fig. 4-23	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschen an der Referenzstation für PRN 19 und 23	47
Fig. 4-24	Datenbasis der ROVER-Empfänger zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens.....	48
Fig. 4-25	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschen der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (30.01.2007)	48
Fig. 4-26	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschen der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (31.01.2007)	49
Fig. 4-27	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschen der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (01.02.2007)	49
Fig. 4-28	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschen der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (02.02.2007)	49
Fig. 4-29	Stationsbezogene Standardabweichung des L1- Phasenrauschens pro ROVER-Empfänger und Tag	50
Fig. 4-30	Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (30.01.2007).....	50
Fig. 4-31	Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (31.01.2007).....	51
Fig. 4-32	Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (01.02.2007).....	51
Fig. 4-33	Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (02.02.2007).....	51
Fig. 4-34	Quotient aus Standardabweichung des Phasenrauschens beim GRTK und der Referenzstandardabweichung pro Satellit und Tag	53
Fig. 4-35	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1-Phasenrauschens vom PRN 19 am 01.02.2007	53
Fig. 4-36	Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an der Referenzstation.....	55
Fig. 4-37	Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens an den ROVER(n) am 30.01.2007.....	56
Fig. 4-38	Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an den ROVER(n) am 31.01.2007.....	56
Fig. 4-39	Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an den ROVER(n) am 01.02.2007.....	57
Fig. 4-40	Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an den ROVER(n) am 02.02.2007.....	57
Fig. 4-41	Perzentil P95 der pro Minute bestimmten Standardabweichung des L1 Phasenrauschens für den Zeitraum 9:00 – 10:00 UT (Ostseepassage, 31.01.2007).....	58

Fig. 4-42	Perzentil P95 der pro Minute bestimmten Standardabweichung des L1 Phasenrauschens für den Zeitraum 11:00 – 12:00 UT (Überseehafen, 31.01.2007)	59
Fig. 4-43	Prädiktionsfehler bei detektierten Cycle Slips in den GRTK-Messungen am 31.01.2007	60
Fig. 4-44	L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an der Referenzstation an den 4 Messtagen	62
Fig. 4-45	L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 30.01.2007	62
Fig. 4-46	L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 31.01.2007	62
Fig. 4-47	L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 01.02.2007	63
Fig. 4-48	L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 02.02.2007	63
Fig. 4-49	Standardabweichung des L1- und L2-Phasenrauschens pro Minute an der Referenzstation und am ROVER-Empfänger GDLR für 2 ausgewählte Satelliten (30.01.2007)	64
Fig. 4-50	L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an der GBAS und am GDLR (30.01.2007)	64
Fig. 4-51	L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an der GBAS und am GDLR für PRN 7, 19, 26 und 27 (30.01.2007).....	65
Fig. 5-1	SNR-Messungen an verschiedenen ROVER-Empfängern in Relation zueinander (PRN 3, 30.01.2007, bei GDLR SNR0 anstatt sonst SNR1).....	66
Fig. 5-2	SNR-Messungen an verschiedenen ROVER-Empfängern in Relation zueinander (PRN 26, 30.01.200, bei GDLR SNR0 anstatt sonst SNR1).....	67
Fig. 5-3	Differenz der SNR-Messungen vom GGEG und GNSS (PRN 26, 30.01.2007)	67
Fig. 5-4	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an der Referenzstation an den 4 Messtagen.....	68
Fig. 5-5	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 30.01.2007.....	69
Fig. 5-6	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 31.01.2007.....	70
Fig. 5-7	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 01.02.2007.....	70
Fig. 5-8	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 02.02.2007.....	70
Fig. 5-9	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an der Referenzstation sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR	71
Fig. 5-10	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (30.01.2007).....	72
Fig. 5-11	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (31.01.2007).....	73

Fig. 5-12	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (01.02.2007).....	73
Fig. 5-13	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (02.02.2007).....	74
Fig. 5-14	Mittelwert und Standardabweichung des SNR vom PRN 18 an der Referenzstation im Zeitraum vom 30.01. bis 02.02.2007	75
Fig. 5-15	Mittelwert und Standardabweichung des SNR vom PRN 14 an der Referenzstation im Zeitraum vom 30.01. bis 02.02.2007	76
Fig. 5-16	Mittelwert und Standardabweichung des SNR vom PRN 16 an der Referenzstation im Zeitraum vom 30.01. bis 02.02.2007	77
Fig. 5-17	Momentanwert des SNR und zugeordnetes Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 16, Referenzstation, 30.01.2007)	77
Fig. 5-18	Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (Referenzstation)	79
Fig. 5-19	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 14, Referenzstation, 30.01.2007)	80
Fig. 5-20	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 24, Referenzstation, 30.01.2007)	80
Fig. 5-21	SNR und seine Standardabweichung gemessen an der Referenzstation und an den ROVER(n) am 31.01.2007 (PRN 19).....	81
Fig. 5-22	SNR und seine Standardabweichung gemessen an der Referenzstation und an den ROVER(n) am 31.01.2007 (PRN 8).....	82
Fig. 5-23	Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 30.01.2007).....	82
Fig. 5-24	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 3, GGEG, 30.01.2007)	83
Fig. 5-25	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 3, GRTK, 30.01.2007)	83
Fig. 5-26	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 22, GGEG, 30.01.2007)	84
Fig. 5-27	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 22, GRTK, 30.01.2007)	84
Fig. 5-28	Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 31.01.2007).....	85
Fig. 5-29	Momentanwert des SNR sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 7, GNSS, 31.01.2007)86	
Fig. 5-30	Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 01.02.2007).....	86
Fig. 5-31	Momentanwert des SNR sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 3, GNSS, 01.02.2007)87	
Fig. 5-32	Momentanwert des SNR sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 18, GNSS, 01.02.2007)	87

Fig. 5-33	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 23, GNSS, 01.02.2007)	87
Fig. 5-34	Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 02.02.2007)	88
Fig. 5-35	Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 18, GNSS, 01.02.2007)	88
Fig. 5-36	Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an der Referenzstation sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil	90
Fig. 5-37	Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 30.01.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil	91
Fig. 5-38	Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 31.01.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil	91
Fig. 5-39	Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 01.02.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil	92
Fig. 5-40	Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 02.02.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil	92
Fig. 6-1	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (30.01.2007)	95
Fig. 6-2	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (31.01.2007)	96
Fig. 6-3	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (01.02.2007)	96
Fig. 6-4	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 3) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)	97
Fig. 6-5	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 11) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)	98
Fig. 6-6	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (02.02.2007)	99
Fig. 6-7	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 13) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)	99
Fig. 6-8	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 20) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)	100
Fig. 6-9	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (30.01.2007)	101
Fig. 6-10	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 25) für die C/A-Rangemessungen (30.01.2007)	102
Fig. 6-11	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 25) für die P1-Rangemessungen (30.01.2007)	102
Fig. 6-12	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (31.01.2007)	103

Fig. 6-13	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (01.02.2007)	103
Fig. 6-14	Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 23) für die C/A-Rangemessungen (01.02.2007)	104
Fig. 6-15	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (02.02.2007)	105
Fig. 6-16	Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (30.01.2007)	106
Fig. 6-17	Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (31.01.2007)	106
Fig. 6-18	Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (01.02.2007)	106
Fig. 6-19	Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (02.02.2007)	107
Fig. 6-20	Erhöhter Mehrwegefehler an den ROVER(n) (31.01.2007)	108
Fig. 6-21	Erhöhter Mehrwegefehler an den ROVER(n) (01.02.2007)	108
Fig. 6-22	Erhöhter Mehrwegefehler an den ROVER(n) (02.02.2007)	109
Fig. 12-1	Lage der Referenzstation	135

Abkürzungen

GBAS	- Kurzbezeichnung für Referenzstation
GDLR	- Kurzbezeichnung für Empfänger an Bord der „Prof. A. Penck“, der mit der DLR-spezifischen Firmware (20 Hz) betrieben wurde und nur GPS-Signale empfangen und prozessiert hat
GDLR	- Kurzbezeichnung für Empfänger an Bord der „Prof. A. Penck“, der mit der Firmware 3.1 (20 Hz) betrieben wurde und die Positionsbestimmung mit GPS- und EGNBOS-Signalen ausgeführt hat (20 Hz).
GLONASS	- Global Navigation Satellite System (Russland)
GNSS	- Kurzbezeichnung für Empfänger an Bord der „Prof. A. Penck“, der mit der Firmware 3.1 (20 Hz) betrieben wurde und die Positionsbestimmung mit GPS- und GLONASS-Signalen ausgeführt hat (20 Hz).
GPS	- Global Positioning System (USA)
GRTK	- Kurzbezeichnung für Empfänger an Bord der „Prof. A. Penck“, der mit der Firmware 3.1 (20 Hz) betrieben wurde und die Positionsbestimmung mit GPS- und GLONASS-Signalen sowie unter Verwendung von differentiellen Korrekturen der Referenzstation ausgeführt hat (20 Hz).
ID	- Identifikationsnummer, wird bei GLONASS-Satelliten anstatt der PRN-Nummer verwendet und ergibt sich aus der Frequenzkanalnummer; dadurch können zwei Satelliten unter der gleichen ID ausgewiesen sein
mean	- Mittelwert
NANU	- Notice Advisory to Navstar Users
NMEA	- National Marine Electronics Association
RINEX	- Receiver Independent Exchange Format
ROVER	- Kurzbezeichnung für Empfänger der mobilen Messplattform an Bord des Forschungsschiffs „Prof. A. Penck“
stdev	- Standardabweichung
STEC	- Slant TEC
TEC	- Total Electron Content
TN	- Technical Note
TTC	- Trimble Total Control

ALEGRO – Überblick

Der Forschungshafen Rostock ist eine Initiative des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Er ist einerseits als Netzwerk der regionalen Industrie sowie von Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen des Landes zu verstehen und dient der Vorbereitung der wirtschaftlichen Verwertung von Galileo im maritimen Umfeld. Andererseits ist er die experimentelle Plattform, auf deren Grundlage die Validierung und Demonstration neuer Produkte und Verfahren zur genauen und sicheren Navigation sowohl zu Wasser als auch im Hafenumfeld unter realen Nutzungsbedingungen erfolgt.

Das Projekt ALEGRO ist eines der Initialprojekte des Forschungshafens Rostock und ist auf die Entwicklung und Demonstration von Ground Based Augmentation Systems (GBAS) für maritime „Safety of Life“-Anwendungen ausgerichtet. Diese werden gebraucht, um Anforderungen der International Maritime Organisation an die GNSS-Genauigkeit und Integrität im Hafenbereich zu erfüllen.

Das Projekt selbst ist in vier Phasen unterteilt:

Phase 1

- Durchführung einer Initialmesskampagne zur Gewinnung von Messdaten unter maritimen Empfangsbedingungen und zur Bewertung der erreichbaren Genauigkeit und Verfügbarkeit von GNSS-basierter Ortung beim Einsatz verschiedener GNSS-Standardtechnologien (stand alone, mit EGNOS-Korrekturen, mit differentiellen Korrekturen einer Referenzstation).

Phase 2

- Aufbau und Inbetriebnahme der Referenzstation im Forschungshafen Rostock
- Entwicklung von Algorithmen und Verfahren zur Bewertung von GNSS in Echtzeit (GNSS Performance Assessment Facility) und Implementierung dieser in die Processing Facility der Referenzstation im Hafen Rostock

Phase 3

- Weiterentwicklung der RTK-Verfahren durch Nutzung der mit Galileo möglichen multi-carrier Signalprozessierung und Qualifizierung der RTK-Verfahren in Hinblick auf zu erfüllende Integritätsanforderungen
- Stufenweiser Ausbau der Processing Facility der Referenzstation im Hafen Rostock inklusive Durchführung notwendiger Validierungstests

Phase 4

- Experimentelle Validierung der erweiterten RTK-Verfahren durch Vorbereitung und Durchführung von Messkampagnen in Bezug auf spezifische maritime Anwendungen

Der folgende Bericht ordnet sich in Phase 1 ein und ist einer von 5 technischen Berichten, die sich entweder mit der Durchführung oder den Messergebnissen der Initialmesskampagne auseinandersetzen.

1 Einführung

Zielstellung des folgenden technischen Berichts ist die Bewertung der Rohdatenqualität und –Verfügbarkeit von Navigationssignalen, die während der Initialmesskampagne im Forschungshafen Rostock an der Referenzstation und an den 4 Empfängern auf dem Forschungsschiff „Prof. A. Penck“ gemessen wurden. Rohdaten im eigentlichen Sinne sind Code- und Trägerphasenmessungen auf beiden Trägern (GPS: L1- und L2-Trägerfrequenz, GLONASS: entsprechend Frequenzkanal jeweils eine satellitenspezifische Trägerfrequenz im oberen und untern L-Band).

In Bezug auf jeden einzelnen Empfänger soll die Datenauswertung u.a. folgende Informationen liefern:

1. Vollständigkeit der aufgezeichneten Daten im RINEX-Format und gegebenenfalls Identifikation von Zeitepochen ohne Datenbereitstellung.
2. Qualität der Phasenmessungen auf beiden Trägern beschrieben durch bestimmtes Phasenrauschen und detektierte Cycle Slips.
3. Qualität der Rangemessungen beschrieben durch unkalibrierten Mehrwegefehler auf den C/A-Codephasen.
4. Anzahl parallel verfügbarer und als nutzbar eingestufte Rohdaten im Zeitbezug als ein Maß zur Bewertung bestimmter Positionslösungen.
5. Ausreißererkennung aus Rohdatensicht

Diese Informationen sind die Grundlage für weiterführende Analysen auf Rohdatenbasis. Im Fall der Referenzstation, die während des gesamten Messzeitraums an der gleichen Position betrieben wurde, sind zumindest im Fall von GPS Qualitätsparameter der Rohdaten unter gleichen geometrischen Empfangsbedingungen ermittelbar und vergleichbar. Dieses resultiert aus der Wiederholbarkeit der Satellitensichtbarkeit nach einem Sternentag.

Die 4 Empfänger auf dem Forschungsschiff „Prof. A. Penck“ wurden an der gleichen Antenne betrieben. Es ist folglich davon auszugehen, dass szenario- und ausbreitungsbedingte Einflüsse auf die Rohdatenqualität aller 4 Empfänger als identisch einzustufen sind. Unterschiede in der Rohdatenqualität sind zu bestimmen und erlauben erste Aussagen, über die Relativgenauigkeit der Messwerte und über empfängerbedingte Effekte.

In den NMEA-Datensätzen, die ebenfalls pro Empfänger aufgezeichnet wurden, sind neben den ermittelten Positionen Zusatzinformationen enthalten wie z.B. welche Satelliten zur Positionsbestimmung verwendet wurden. Die notwendige Referenzierung der Position der Referenzstation wie auch der Trajektorien des Forschungsschiffs „A. Penck“ wurde mit Hilfe der TTC-Postprozessierungssoftware vorgenommen. Auch sie stellt Zusatzinformation wie z.B. die Standardabweichung der Positionslösung bereit. Durch die Analyse höherwertiger Ergebnisse (Empfängerfirmware, TTC-Ergebnisse) in Bezug auf die Qualität und Verfügbarkeit gemessener Rohdaten wird einerseits ein vertieftes Verständnis des Systemverhaltens erwartet und andererseits eine Abschätzung von Genauigkeits- und Integritätsrisiken angestrebt. Dies erfordert aber die Zusammenführung aller Datenanalysen (NMEA-Datensätze, Erwartungswerte aus Georeferenzierung, TTC-Ergebnisse bzgl. Sollpositionen, Soll-Ist-Vergleich durch Gegenüberstellung TTC- und NMEA-Positionslösungen). Erste Vergleiche und Aussagen in Bezug auf die Rohdatenqualität sind Bestandteil dieser TN. Eine Komplettierung erfordert die Zusammenführung der Teilanalysen in allen Bereichen.

2 Datenbasis

Der Messaufbau, gewonnene Daten, deren Inhalte und Archivierung ist Gegenstand von [Ref 1]. Die für die im Rahmen dieser Dokumentation genutzten Analysesoftware sei einerseits auf [Ref 2] und [Ref 3] verwiesen sowie auf die Ausführungen zu ihrer Nutzung in Kapitel 9 (Anlage A).

Die folgende Kurzbeschreibung stellt den Bezug zur genutzten Datenbasis für die in dieser TN dargestellten Ergebnisse her.

2.1 Referenzstation

Die Referenzstation befand sich während der gesamten Messkampagne am Pier 1 und wurde kontinuierlich betrieben. Grundlage der Auswertung sind die in RINEX-Stundenfiles konvertierten Rohdaten.

Datum	Datenfiles	Verfügbare Stundenfiles	Messdauer	GNSS	fs (Hz)
30.01.2007	GBAS030h.07O	h = A...X	0:00 – 24:00	GPS, GLONASS	20
31.01.2007	GBAS031h.07O	h = A...X	0:00 – 24:00	GPS, GLONASS	20
01.02.2007	GBAS032h.07O	h = A...X	0:00 – 24:00	GPS, GLONASS	20
02.02.2007	GBAS033h.07O	h = A...N	0:00 – 14:10	GPS, GLONASS	20

Tab. 2-1 Datenbasis Referenzstation

2.2 Forschungsschiff „Prof. A. Penck“

Messfahrten fanden in der Regel zwischen 6:00 und 15:00 UT statt. An Bord waren 4 Empfänger, die an der gleichen Antenne jedoch mit unterschiedlichen Konfigurationen betrieben wurden. Grundlage der Auswertung sind die pro Empfänger in RINEX-Stundenfiles konvertierten Rohdaten.

Datum	Datenfiles	Verfügbare Stundenfiles	Messdauer	GNSS	fs (Hz)
30.01.2007	GAMN030h.07O	h = G...N	6:32 – 13:30	GPS	20
	GGEG030h.07O ¹	h = K...N	10:00 – 13:30	GPS	20
	GNSS030h.07O ¹	h = K...N	10:00 – 13:30	GPS + GLONASS	20
	GRTK030h.07O	h = G...N	6:32 – 13:30	GPS + GLONASS	10
31.01.2007	GAMN031h.07O	h = H...N	7:04 – 13:30	GPS	20
	GGEG031h.07O	h = H...N	7:03 – 13:30	GPS	20
	GNSS031h.07O	h = H...N	7:03 – 13:30	GPS + GLONASS	20
	GRTK031h.07O	h = H...N	7:03 – 13:30	GPS + GLONASS	10

¹ Aufzeichnung mit Datenrate größer 1 Hz erst ab 10:00 UT.

01.02.2007	GAMN032h.07O	h = G...O	6:50 – 14:28	GPS	20
	GGEG032h.07O	h = G...O	6:49 – 14:28	GPS	20
	GNSS032h.07O	h = G...O	6:48 – 14:27	GPS + GLONASS	20
	GRTK032h.07O	h = G...O	6:49 – 14:27	GPS + GLONASS	10
02.02.2007	GAMN033h.07O	h = G...O	6:51 – 14:26	GPS	20
	GGEG033h.07O	h = G...O	6:51 – 14:21	GPS	20
	GNSS033h.07O	h = G...O	6:50 – 14:21	GPS + GLONASS	20
	GRTK033h.07O	h = G...O	6:50 – 14:21	GPS + GLONASS	10

Tab. 2-2 Datenbasis Forschungsschiff „Prof. A. Penck“

Eine möglichst hochratige Datenaufzeichnung wurde bei allen Empfängern angestrebt, um die bereits existierenden Echtzeitprozessoren des Evnet zur Bestimmung der Rohdatenqualität nutzen zu können. Beim Empfänger GRTK, der die Positionsbestimmung mit Hilfe der differentiellen Korrekturen der Referenzstation durchführt, wurde die Abtastfrequenz auf 10 Hz reduziert, um nicht an den Grenzen der Prozessorkapazität des Empfängers zu arbeiten. Bei den anderen wurde eine einheitliche Abtastfrequenz von 20 Hz gewählt.

Unterschiede bei der Wahl zu nutzender Navigationssignale (GPS oder GPS + GLONASS) begründen sich wie folgt:

- Der Empfänger GAMN (im Folgenden auch GDLR genannt) ist mit einer speziellen Firmware ausgestattet, die Zusatzinformationen bezüglich der Signalstärke in Form von Amplitudenwerten bereitstellt. Die Entwicklung unterstützt nur den Empfang und die Verarbeitung von GPS-Signalen, jedoch nicht die Positionsbestimmung. Er ist primär als Referenzempfänger für die Rohdatenanalyse vorgesehen.
- Der Empfänger GGEG wurde so konfiguriert (Firmware 3.1), dass die GPS-Lösung unter Verwendung von EGNOS-Korrekturen bestimmt wird.
- Der Empfänger GNSS (Firmware 3.1) bestimmt die Position unter ausschließlicher Verwendung der Navigationssignale und aufmodulierter Navigationsdaten („stand alone“). Eine höhere Signalverfügbarkeit wird durch Mitnutzung von GLONASS erreicht.
- Der Empfänger GRTK (Firmware 3.1) dient zur Gewinnung von RTK-basierten Positionslösungen. Um eine direkte Vergleichbarkeit zur „stand alone“ Positionsbestimmung zu haben und um die Anzahl von gleichzeitig an der Referenzstation und am Rover getrackter Signale zu erhöhen, wurde auch hier GLONASS mitgenutzt.

3 Datenverfügbarkeit im RINEX-File²

Unter regulären Bedingungen würde man erwarten, dass für jede Zeitmarke (bei 10 Hz alle 0.1 s und bei 20 Hz alle 0.05 s) Rohdaten im RINEX-File vorhanden sind. Bereits vorliegende Messerfahrungen mit dem eingesetzten Empfänger zeigten, dass es partiell zu Lücken in den aufgezeichneten Rohdaten kommen kann, wenn der Prozessor des Empfängers an seinen Kapazitätsgrenzen arbeitet. Gründe dafür können einerseits eine extrem erhöhte

² Fig. 3-1 bis Fig. 3-5 wurden mit RINEX-Availability.xmcd auf der Grundlage der durch den CSD (Entwicklungsumgebung) generierten Log-Files erzeugt.

Satellitensichtbarkeit und andererseits auch erhöhter Stress beim Signalempfang und der zugeordneten Datengewinnung sein.

3.1 Referenzstation

Zeitpunkte oder Zeiträume (kurz Ereignisse genannt), für die keine Daten an der Referenzstation aufgezeichnet wurden, sind in Fig. 3-1 in ihrer Zeitabhängigkeit dargestellt. Eine deutliche Wiederholbarkeit an allen 4 Tagen, die ein Indiz für einen geometrischen Bezug und damit verbundenen Empfängerstress darstellt, konnte nicht beobachtet werden.

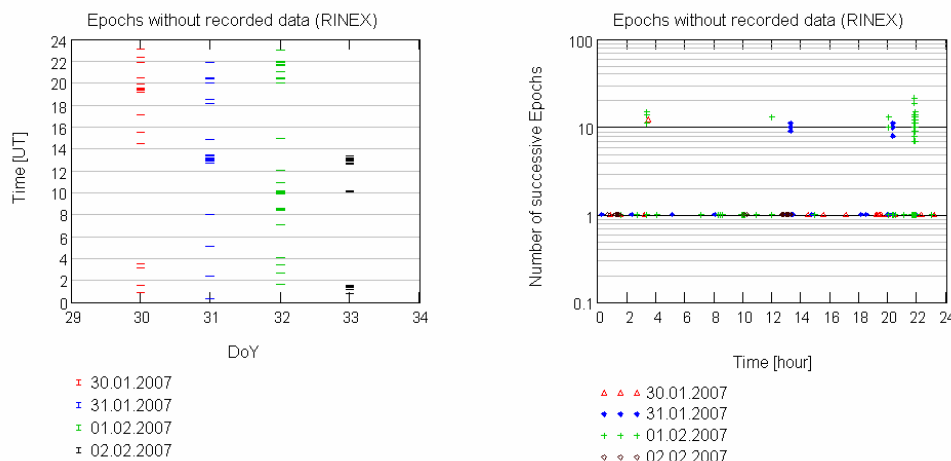


Fig. 3-1 Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der Referenzstation

In den meisten Fällen treten Epochen ohne Datenaufzeichnung als Einzelereignisse auf, d.h. bei den vorhergehenden und nachfolgenden Epochen wurden Rohdaten aufgezeichnet. Ihre Anzahl unterscheidet sich jedoch von Tag zu Tag. Besonders hervorzuheben ist, dass am 1.02.2007 die höchste Anzahl solcher Aussetzer in der Datenaufzeichnung als auch die längste Dauer (bis über 1 Sekunde, also mehr als 20 aufeinander folgende Epochen) zu beobachten waren.

Tab. 3-1 Anzahl von Ereignissen ohne Datenaufzeichnung an der Referenzstation klassifiziert nach ihrer Dauer

Datum	Anzahl der Ereignisse	Dauer 1 Epoche	Dauer >1 Epoche	Anzahl von Messepochen (%) ohne Datenbereitstellung
30.01.2007	126	125	1	0.0079 %
31.01.2007	205	193	12	0.0182 %
01.02.2007	429	366	63	0.0645 %
02.02.2007	407 ³	406	1	0.0235 %

In Tab. 3-1 ist weiterhin die Dauer solcher Lücken im Zeitbezug für alle 4 Tage gegenübergestellt. Eine eindeutige Wiederholbarkeit nach einem Sternentag ist bei den meisten Ereignissen nicht gegeben, obwohl Zeiträume mit einem erhöhten Auftreten an mindestens 2

³ Kein vollständiger Messtag.

Tagen erkennbar sind. Ein nicht erklärbares Phänomen ist das gehäufte Auftreten am 31.01. und 02.02. um 13 Uhr, wobei nur am 31.01. mehrere aufeinander folgenden Epochen betroffen sind

Fehlende Dateneinträge, die nur eine oder wenige Epochen andauern, also deutlich unter einer Sekunde liegen, sind unbedenklich hinsichtlich der Kontinuität der Rohdatenbewertung mittels der im EVnet verwendeten Echtzeitprozessoren ([Ref 2], [Ref 3]). Sollte ihr Auftreten jedoch durch eine geringere Signalqualität im Sinne von dadurch stärker gebundener Prozessorleistung hervorgerufen werden, so könnte dies temporär mit einer schlechteren Schätzung des Signalrauschens (Phase und Signalstärke) korrelieren.

Effektiv ist die Anzahl von Epochen ohne Datenbereitstellung als sehr gering in Relation zu Anzahl von Epochen mit bereitgestellten Rohdaten zu bewerten (siehe Tab. 3-1). Bei mehr als 99.9% der Messzeitpunkte werden Rohdaten über den Empfängeranalogausgang bereitgestellt.

3.2 Forschungsschiff „Prof. A. Penck“

In den folgenden Grafiken (Fig. 3-2 bis Fig. 3-5) werden die Epochen aller ROVER tageweise dargestellt, für die keinerlei Dateneinträge in den RINEX-Files vorhanden waren. Ergänzend ist die jeweilige Dauer angegeben. Aus dem Parallelbetrieb von 4 Empfängern an einer Antenne ergibt sich die Möglichkeit zwischen externen und internen Ursachen zu unterscheiden.

Beim Vergleich der 4 Abbildungen wird deutlich erkennbar:

- Eine eindeutige zeitliche Korrelation bezüglich nicht bereitgestellter Daten zwischen den Empfängern ist nicht erkennbar. Damit können externe Ursachen (u.a. geometrisches Szenario, GNSS Signalperformance, Ausbreitungsfehler) ausgeschlossen werden.
- Der GRTK-Empfänger, der nur mit 10 Hz Abtastfrequenz betrieben wird, weist die geringste Anzahl von Epochen ohne Dateneinträge auf. Rohdaten werden bei mehr als 99.99% der Zeitpunkte aufgezeichnet. Am 30.01. und 01.02. wird eine 100%-ige Datenverfügbarkeit erreicht.
- GGEG und GNSS operieren mit der gleichen Firmware, werden aber mit der doppelten Abtastfrequenz im Vergleich zum GRTK betrieben. Beim GGEG wird die höchste Anzahl von Epochen ohne Datenbereitstellung auch im Vergleich zum GNSS beobachtet. Während GGEG neben GPS das EGNOS-Signal zusätzlich trackt und dessen Informationen mit zur Positionsbestimmung nutzt, wird beim GNSS die Position aus GPS-Signalen und im Durchschnitt 4 zusätzlichen GLONASS-Signalen bestimmt.
- Der GDLR dient ausschließlich zur Rohdatenaufzeichnung mit 20 Hz mit einer speziellen Firmware. Eine Position wird nicht empfängerintern bestimmt. Bei ihm kann wie beim GRTK von vereinzelt auftretenden Epochen ohne Datenaufzeichnung gesprochen werden.

30.01.2007: 10:00 -13:30

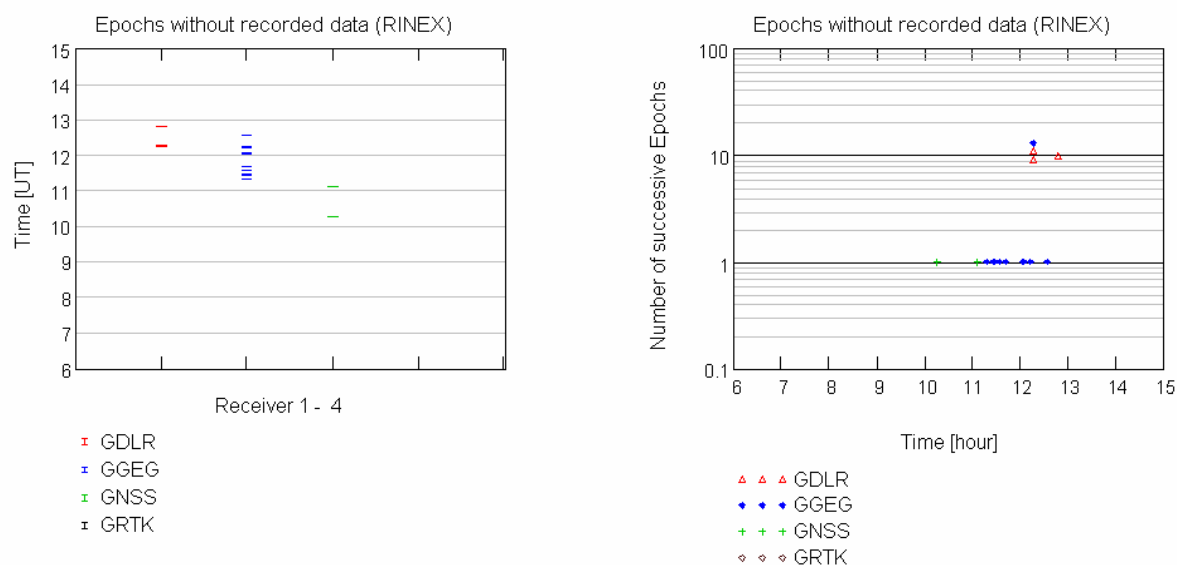


Fig. 3-2 Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der Referenzstation (Rover – 30.01.2007)

31.01.2007: 7:04 - 13:30

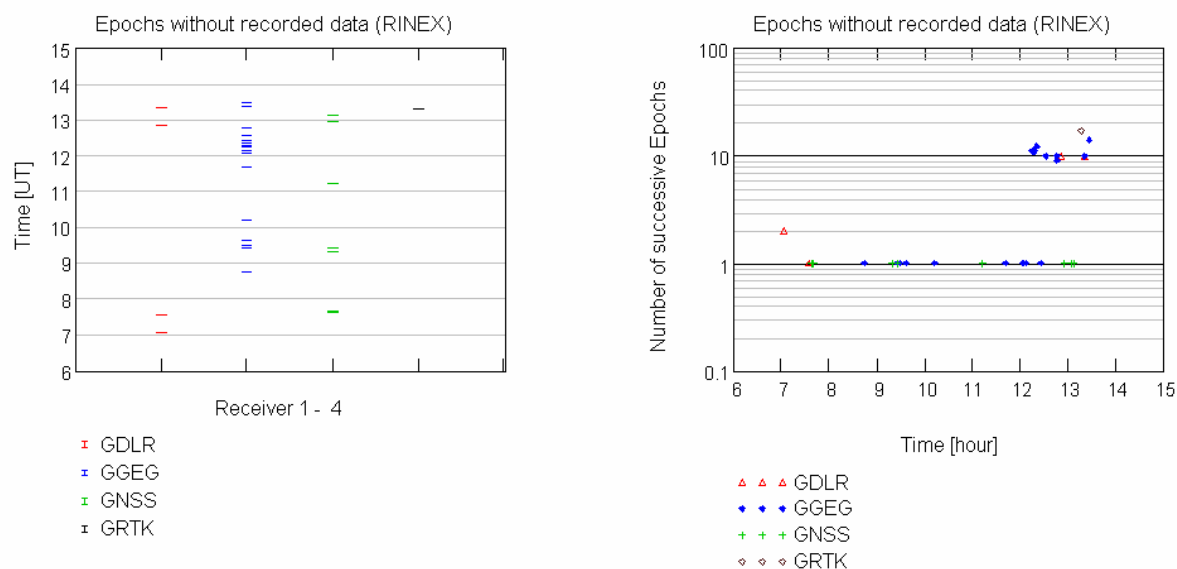


Fig. 3-3 Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der der Referenzstation (Rover – 31.01.2007)

01.02.2007: 6:50 - 14:27

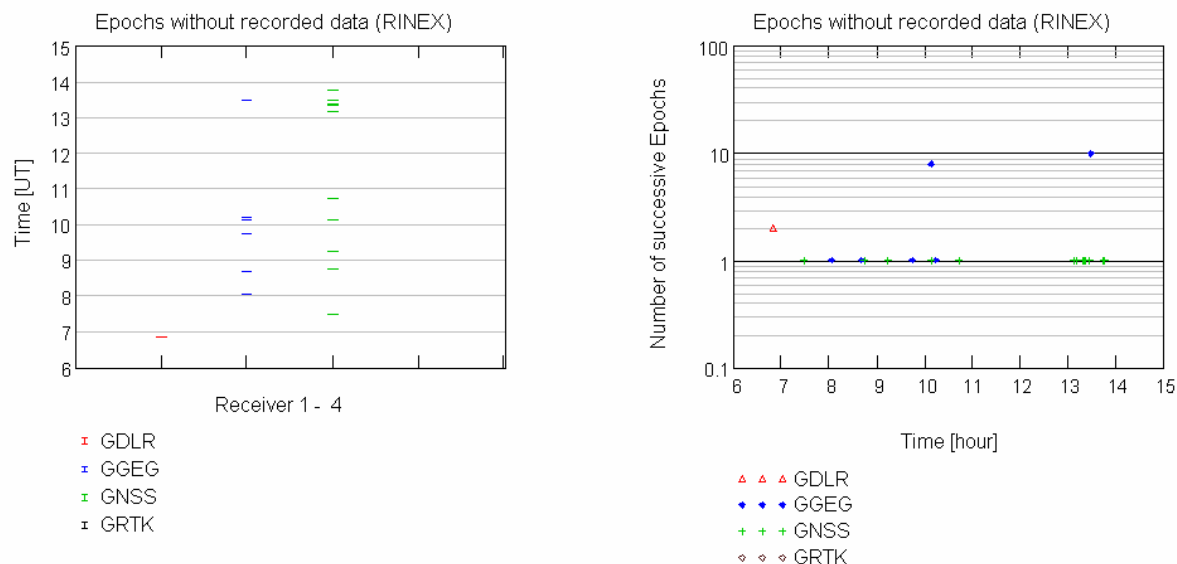


Fig. 3-4 Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der der Referenzstation (Rover – 01.02.2007)

02.02.2007: 6:51 - 14:21

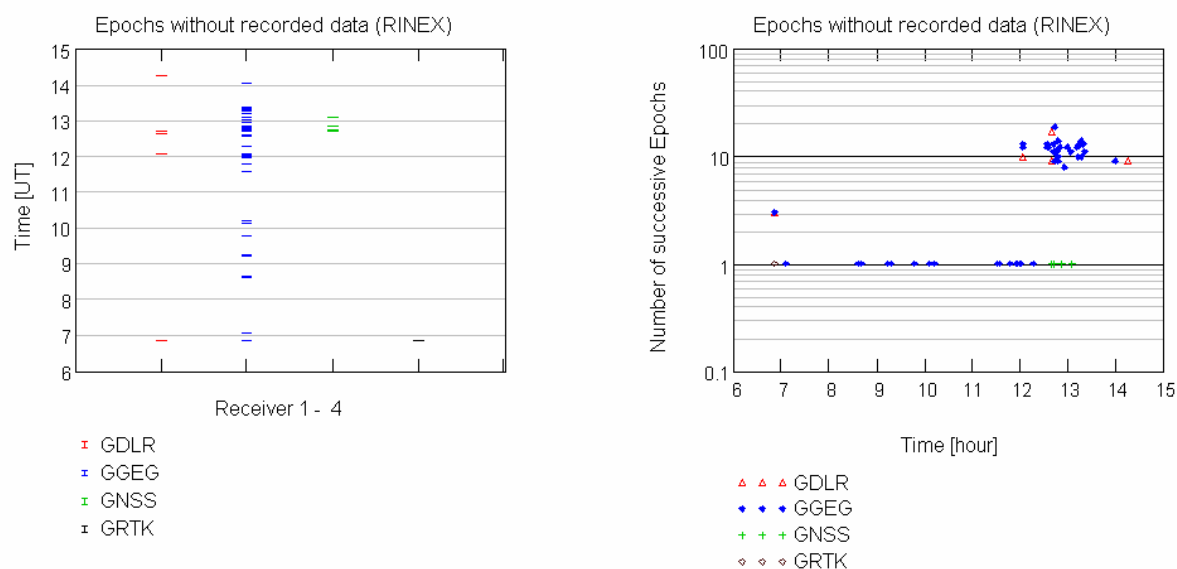


Fig. 3-5 Epochen ohne Rohdateneinträge im RINEX-File als Funktion der Zeit und Anzahl aufeinander folgender Epochen bei der der Referenzstation (Rover – 02.02.2007)

Tab. 3-2 Ereignisse ohne Datenaufzeichnung an den ROVER(n)

Datum	Empfänger	Anzahl der Ereignisse	Dauer 1 Epoche	Dauer >1 Epoche	Anteil von Messepochen (%) ohne Datenbereitstellung
30.01.2007	GDLR	3	0	3	0.0120
	GGEG	13	12	1	0.0100
	GNSS	2	2	0	0.0008
	GRTK	0	-	-	0.0000
31.01.2007	GDLR	4	1	3	0.0050
	GGEG	23	14	9	0.0242
	GNSS	8	8	0	0.0017
	GRTK	1	0	1	0.0039
01.02.2007	GDLR	1	0	1	0.0004
	GGEG	6	4	2	0.0040
	GNSS	14	14	0	0.0026
	GRTK	0	-	-	0.0000
02.02.2007	GDLR	5	0	5	0.0089
	GGEG	46	17	29	0.0643
	GNSS	5	5	0	0.0009
	GRTK	1	1	0	0.0004

Die These, dass die Aufzeichnungslücken vorrangig mit intern gebundener Prozessorleistung und nicht immer erfolgreiche realisierter Datenausgabe vorrangig zusammenhängen, lässt sich aus den am stärksten mit Datenlücken betroffenen Empfängern ableiten (siehe Tab. 3-2): GGEG durch Mitnutzung von EGNOS für die Positionsbestimmung und GNSS durch GPS und GLONASS basierte Positionsbestimmung bei jeweils 20 Hz Rohdatenaufzeichnung.

3.3 Konstellationsabhängigkeit⁴

Die folgenden 4 Grafiken stellen die Ereignisse, bei denen über eine oder mehrere Epochen keine Daten bereitgestellt wurden, in Relation zur Anzahl getrackter Satelliten dar. Grundlage für die Gegenüberstellung sind die jeweiligen Messzeiträume pro Tag, für die Daten aller Empfänger verfügbar und damit vergleichbar sind. Für die Referenzstation werden ergänzend die Anzahl von Ereignissen (ROVER-Angaben in Tab. 3-1) in den Grafiken nach ihrer Dauer angegeben.

Bereits mit den Ergebnissen vom 30. und 31. 01.2007 (Fig. 3-6 und Fig. 3-7) wird nachgewiesen, dass weder die Satellitenanzahl noch Konstellationswechsel von GPS bzw. GPS+GLONASS als Erklärung für Empfängerstress und damit für nicht erfolgreiche Datenaufzeichnung dienen können. Dies ist daran erkennbar, dass die Ereignisse einerseits sowohl bei geringer als auch hoher Satellitenanzahl zu beobachten sind und andererseits kaum mit einer Änderung der Satellitenanzahl zeitlich korrelieren.

Jedoch sind 2 Besonderheiten erkennbar, die weiter verfolgt werden sollten:

⁴ Fig. 3-6 bis Fig. 3-9 wurden mit NSAT_RINEX.xmcd auf der Grundlage der durch den CSD (Entwicklungsumgebung) generierten Files vom Typ RINEXavailability.dat und LogFile.dat erzeugt.

- Beim GGEG-Empfänger ist an beiden Tagen eine erhöhte Häufigkeit von Datenlücken um die Mittagszeit zu beobachten. Da sie so an den anderen ROVER(n) nicht auftritt, ist ein Bezug zur Signalqualität auszuschließen.
- Am 31.01.2007 wird eine extreme Häufigkeit von Datenlücken gegen 13:00 Uhr an der Referenzstation beobachtet. Sie könnte u.U. aus lokal erhöhten Signalstörungen resultieren, da ein vergleichbares Verhalten bei allen ROVER(n) nicht auftritt.

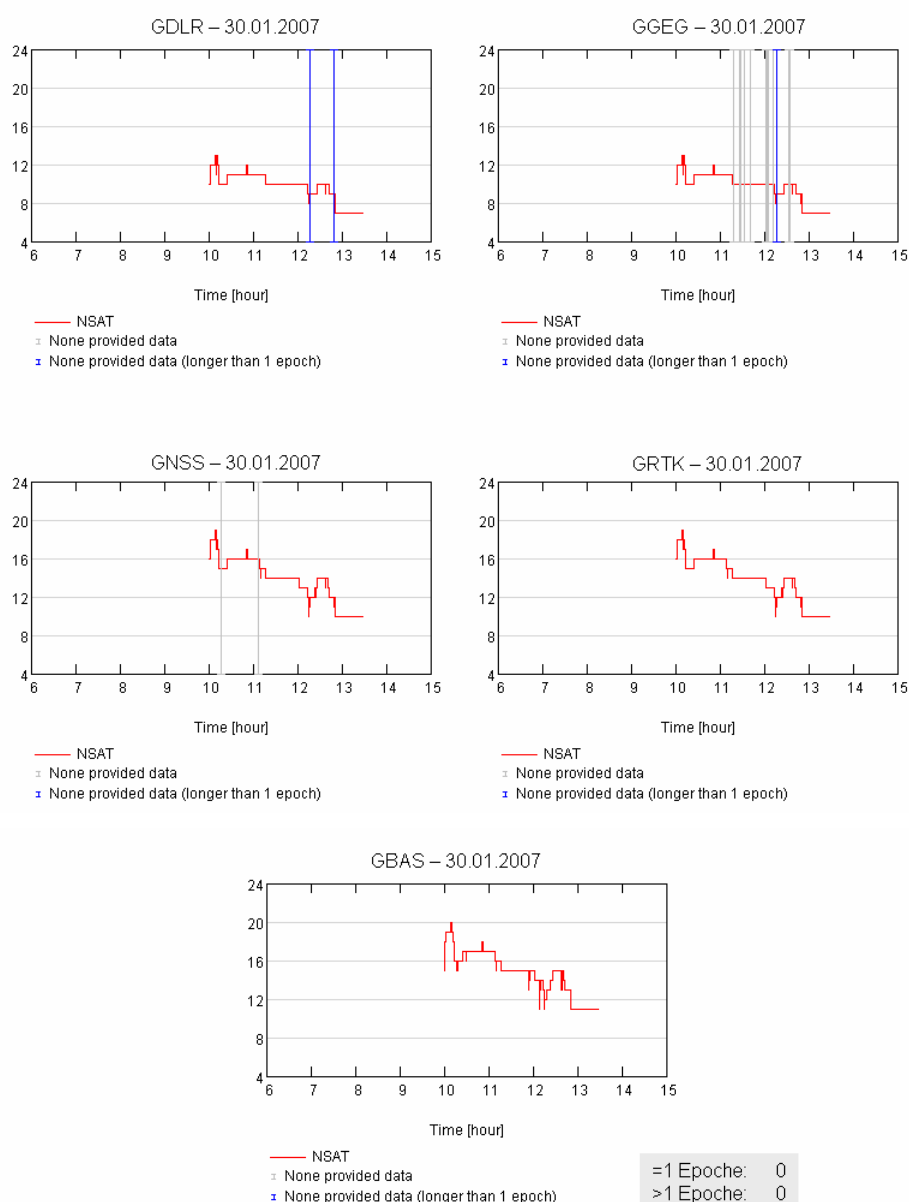


Fig. 3-6 Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (30.01.2007)

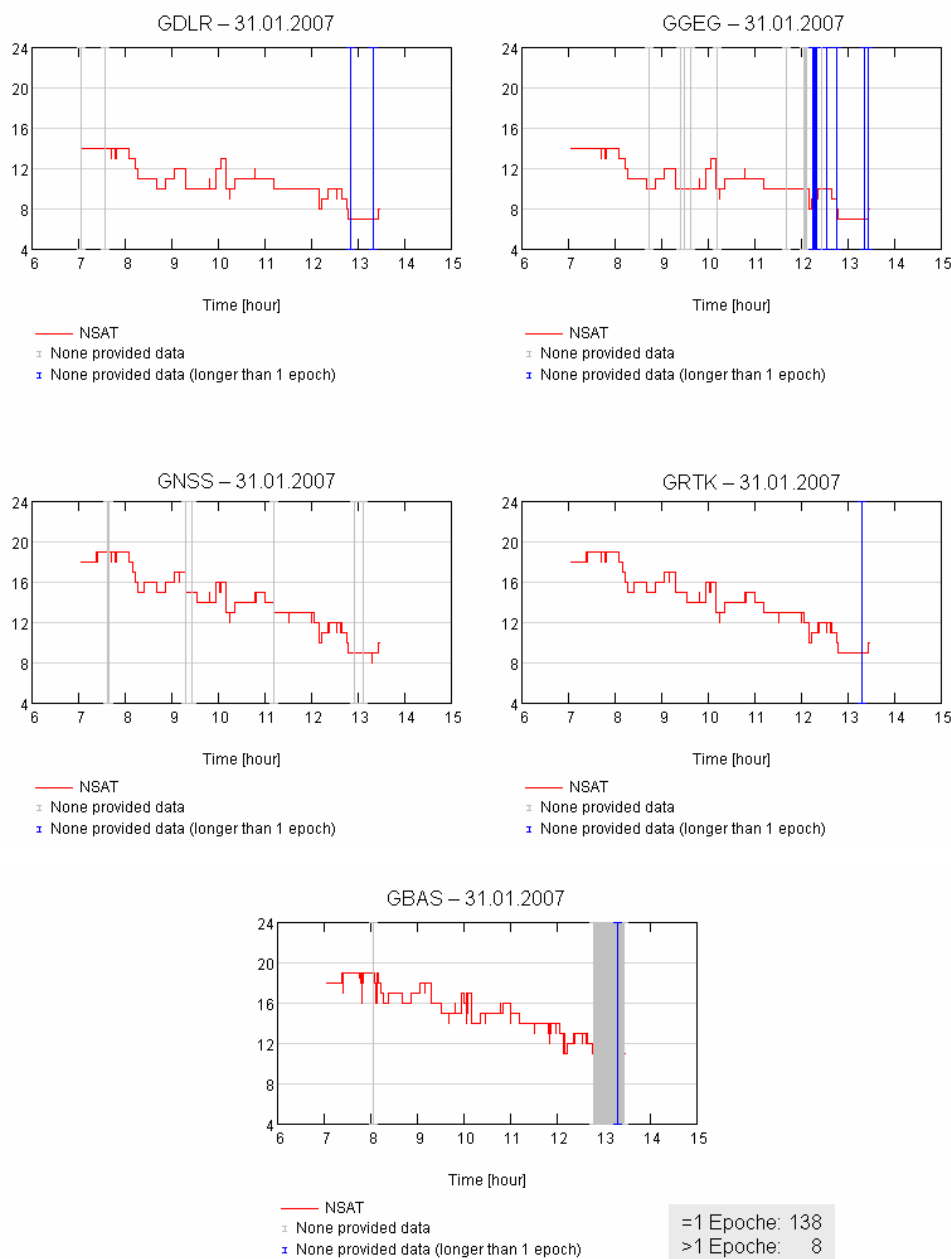


Fig. 3-7 Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (31.01.2007)

Bezieht man in die Analyse noch die Ergebnisse vom 01. und 02.02.2007 (Fig. 3-8 und Fig. 3-9) ein, so kann folgendes festgestellt werden:

- Am 02.02. jedoch nicht am 01.02. ist eine erhöhte Häufigkeit von Datenlücken des GGEG um die Mittagszeit zu beobachten.
- Am 02.02.2007 wird eine extreme Häufigkeit von Datenlücken gegen 13:00 Uhr an der Referenzstation wie schon am 31.01.2007 beobachtet. Sie könnte u.U. aus lokal erhöhten Signalstörungen resultieren, da ein vergleichbares Verhalten bei allen ROVER(n) nicht auftritt.

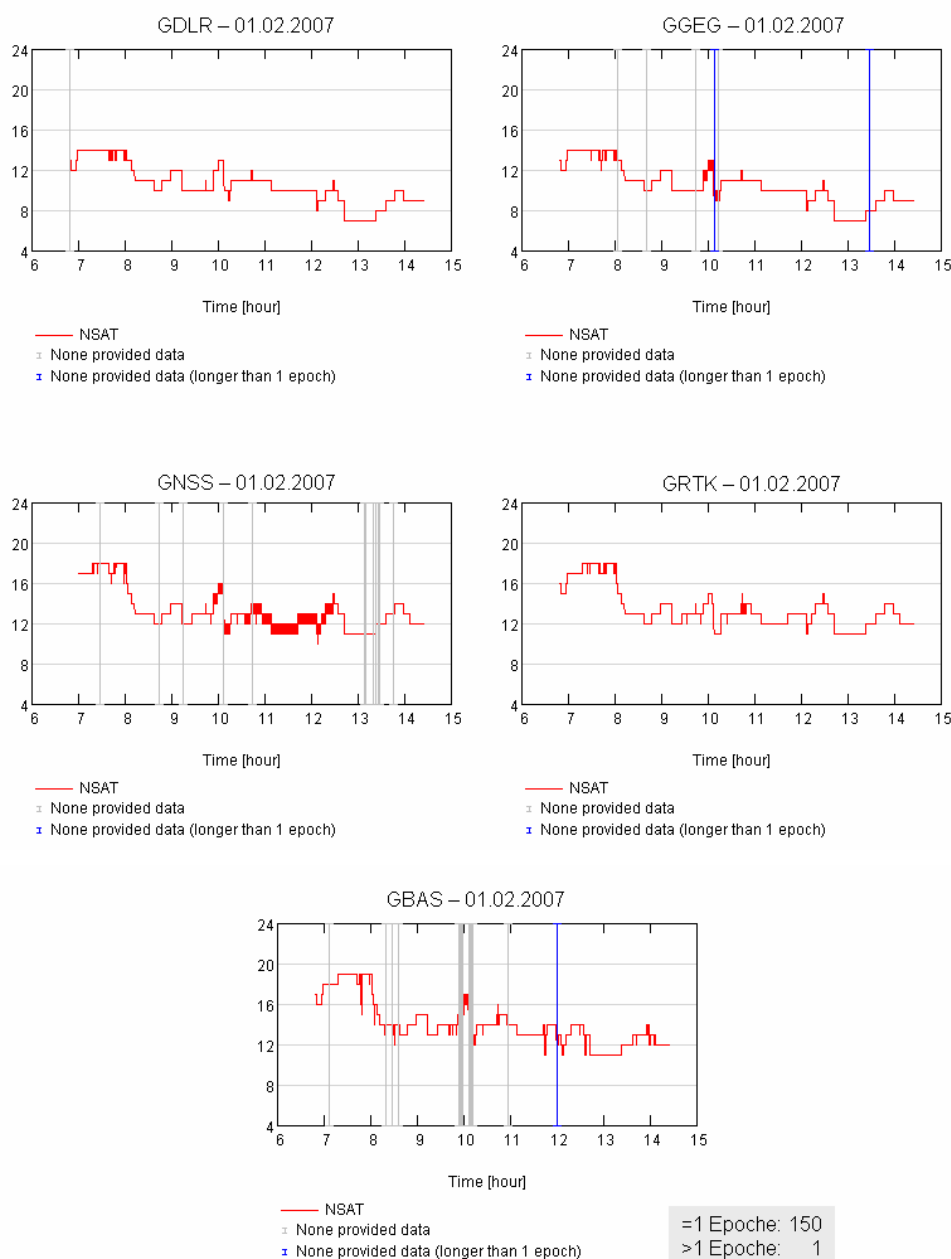


Fig. 3-8 Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (01.02.2007)

Eine weitere Besonderheit, die in der Satellitenanzahl des GNSS nur am 01.02. zu beobachten ist, betrifft das gehäufte Zu- und Abschalten eines oder mehrerer Satelliten zwischen 10:00 und 12:30 Uhr. Das könnte mit PRN 19 von GPS zusammenhängen, der in dieser Zeit als nicht nutzbar gesetzt war (GPS NANU).

In der Availability.dat, die das Trackingprotokoll auf der Grundlage verfügbarer Phasenmessungen enthält, ist nachlesbar, dass das gehäufte Zu- und Abschalten dem PRN 19 zugeordnet ist. Warum es nur beim GNSS-Empfänger und nicht in dem Maße auch bei den anderen Empfängern auftritt, ist nicht erklärbar.

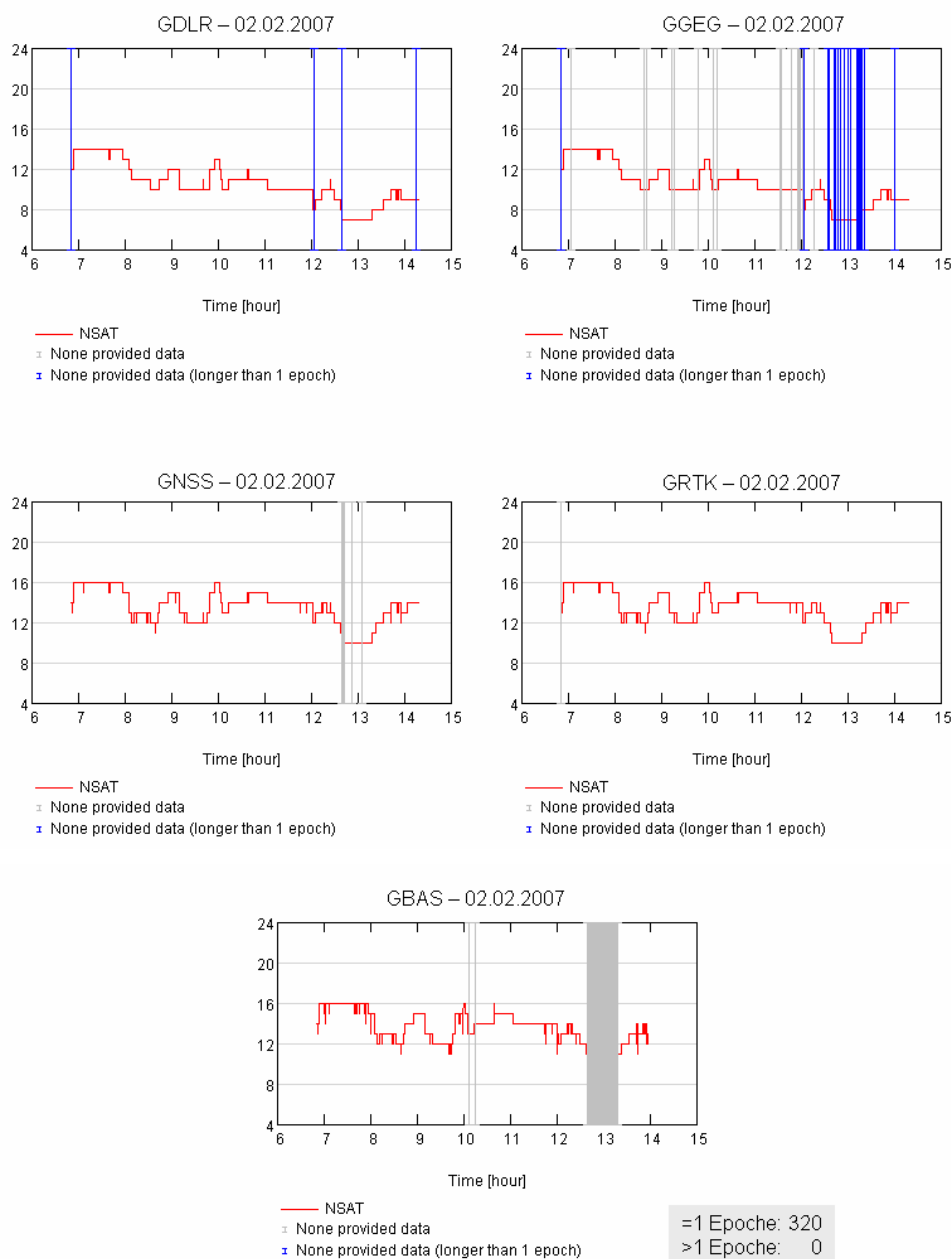


Fig. 3-9 Datenlücken in Relation zur Satellitenanzahl (02.02.2007)

- SF 1**
- Die Unterbrechungen bei der Datenaufzeichnung besitzen keinen ursächlichen Zusammenhang zur Anzahl getrackter Satelliten und ihrer Änderung durch Satellitenauf- und -untergänge.
 - Eine Abhängigkeit der Datenlücken von der Signalqualität kann zumindest bei den ROVER(n) ausgeschlossen werden, da eine zeitliche Korrelation zwischen den Einzelergebnissen nicht nachweisbar ist.
 - Eher ist eine tendenzielle Abhängigkeit zum gewählten Betriebsmodus und der genutzten Datenupdate rate erkennbar.
 - Bei der Referenzstation besteht ein scheinbarer Zeitbezug zwischen dem 31.01. und dem 02.02.2007 hinsichtlich des gehäuftten Auftretens von Datenlücken in der Mittagszeit. Eine Konstellationsabhängigkeit kann ausgeschlossen werden, da diese Effekte nicht am 30.01. und 01.02. zu beobachten sind. Eine vertiefende Betrachtung wird in Bezug auf Signalqualität, Geo-Referenzierung und NMEA-Informationen empfohlen.
 - Mit Ausnahme vom 01.02. ist an allen Tagen eine erhöhte Häufigkeit von Datenlücken des GGEG um die Mittagszeit zu beobachten. Da diese bei den anderen ROVER(n) so nicht auftreten, ist eine Abhängigkeit von der Signalqualität und von den getrackten Satelliten auszuschließen. Eine vertiefende Betrachtung wird in Bezug auf Signalqualität, Geo-Referenzierung und NMEA-Informationen empfohlen.

4 Phasenqualität

Die Phasenqualität wird auf der Grundlage von Qualitätskenngrößen, die durch den CSD-Prozessor abgeleitet werden, beschrieben. Dazu gehören pro Trägerphase

- die detektierten Cycle Slips pro Trägerfrequenz
- die Standardabweichung des Phasenrauschens pro Minute
- das geschätzte Phasenrauschen
- die Kurzzeitstandardabweichung des Phasenrauschens (3 Sekunden).

Das geschätzte Phasenrauschen und die Kurzzeitstandardabweichung werden mit einer der Rohdatenrate identischem Updaterate erzeugt. Die für den CSD verwendete Konfiguration ist in Kapitel 9 (Anlage A) dokumentiert.

4.1 Cycle Slips⁵

Cycle Slips sind sprunghafte Änderungen der Phasenmehrdeutigkeit während des Trackingprozesses, bei dem der Empfänger nicht mehr in der Lage ist, der Phasendynamik fehlerfrei zu folgen. Ursachen dafür können

- Signalüberlagerungen in Folge von Mehrwegeausbreitung,
- ausbreitungsbedingte Signalstörungen durch die Ionosphäre oder Troposphäre
- und bei bewegten Empfängern Stress in Folge extremer Dynamikschwankungen

sein.

4.1.1 Anzahl von Cycle Slips

In Tab. 4-1 ist die Anzahl detektierter Cycle Slips für beide Trägerfrequenzen für jeden Empfänger angegeben. Für die Referenzstation wird die Anzahl von Cycle Slips für den gesamten Messtag sowie für den mit den ROVER(n) gemeinsamen Messzeitraum angegeben, der aber an den Messtagen variiert (siehe Tab. 2-2). Aus dieser Übersicht lassen sich folgende Erkenntnisse und Fragestellungen ableiten:

Am 01.02.2007 ist bei den reinen GPS-Empfängern (GDLR, GGEG) die höchste Anzahl detektierter Cycle Slips zu beobachten. Bei den kombinierten GPS/GLONASS-Empfängern (GNSS, GRTK) gilt, dass die Referenzstation (vergleichbare Datenbasis) auch ihr Maximum an Cycle Slips am 01.02.2007 besitzt, jedoch bei den ROVER(n) (GNSS, GRTK) dieses am 31.01.2007 auftritt.

Die bereits in Tab. 4-1 gekennzeichneten tagesbezogenen Maxima pro Empfänger weisen eine identische Zuordnung auch GNSS-bezogen auf (siehe Tab. 4-2 und Tab. 4-3).

⁵ Grundlage der Datenauswertung sind die vom CSD generierten Ausgabedateien *CYCLE.dat* und *Availability.dat*, die mit Hilfe von *CycleSlip.xmcd* analysiert wurden.

Tab. 4-1 Anzahl detektierter Cycle Slips (L1 – L2)⁶

Date	GBAS	GBAS ⁷	GDLR	GGEG	GNSS	GRTK
30.01.2007	123 - 434	18 - 39	2 - 0	9 - 3	118 - 128	31 - 35
31.01.2007	183 - 539	31 - 85	73 - 47	8 - 6	415 - 471	274 - 76
01.02.2007	148 - 426	65 - 140	92 - 77	102 - 89	28 - 110	59 - 94
02.02.2007	46 - 130	18 - 86	1 - 0	0 - 0	135 - 212	62 - 92
Summe	500 - 1529	132 - 350	168 - 124	119 - 98	696 - 921	424 - 297
Summe total	2029	482	292	217	1617	721

Im Mittel weisen der GDLR- und der GGEG-Empfänger die geringste Anzahl von Cycle Slips auf. Eine Ursache dafür könnte sein, dass beide Empfänger nur GPS-Signale nutzen. Dann müsste die erhöhte Anzahl der Cycle Slips den GLONASS-Signalen zugeordnet sein. In Tab. 4-2 und Tab. 4-3 sind die Anzahl der Cycle Slips systembezogen dargestellt.

Tab. 4-2 Anzahl detektierter Cycle Slips für GPS (L1 – L2)

Date	GBAS ⁷	GDLR	GGEG	GNSS	GRTK
30.01.2007	3 - 0	2 - 0	9 - 3	71 - 49	11 - 6
31.01.2007	11 - 2	73 - 47	8 - 6	251 - 226	165 - 2
01.02.2007	20 - 5	92 - 77	102 - 89	2 - 4	11 - 5
02.02.2007	6 - 0	1 - 0	0 - 0	90 - 80	18 - 6
Summe	40 - 7	168 - 124	119 - 98	414 - 359	205 - 19
Summe total	47	292	217	773	224

Tab. 4-3 Anzahl detektierter Cycle Slips für GLONASS (L1 – L2)

Date	GBAS ⁷	GDLR	GGEG	GNSS	GRTK
30.01.2007	15 - 39	0 - 0	0 - 0	47 - 79	20 - 29
31.01.2007	20 - 83	0 - 0	0 - 0	164 - 245	109 - 74
01.02.2007	45 - 135	0 - 0	0 - 0	26 - 106	48 - 89
02.02.2007	12 - 86	0 - 0	0 - 0	45 - 132	44 - 86
Summe	92 - 343	0 - 0	0 - 0	282 - 562	221 - 278
Summe Total	435	0	0	844	543

⁶ Bei GLONASS wird L1 und L2 zur Zuordnung zum Frequenzband verwendet, obwohl jeder GLONASS-Satellit seine spezifische Trägerfrequenz besitzt. L1 steht dann für den Träger im oberen Frequenzband und L2 für den im unteren L-Band.

⁷ Diese Angabe erfolgt im gleichen Zeitbezug, der für die ROVER-Messwerte gültig ist.

Bei der Referenzstation ist erkennbar, dass sie ~~jetzt~~ die geringste Anzahl detektierte Cycle Slips sowohl bei den GPS- als auch bei den GLONASS-Signalen aufweist. Hier ist die gegenüber GGEG und GDLR erhöhte Gesamtanzahl folglich den GLONASS-Signalen zugeordnet, wobei überproportional GLONASS L2 betroffen ist. Im tageweisen, systembezogenen Vergleich ist auch erkennbar, dass die Referenzstation im Vergleich zu den dynamischen Empfängern meistens die geringste Anzahl von Cycle Slips aufweist. Dass der 01.02.2007 eine Ausnahme darstellt, könnte ein Indiz für erhöhte Signalstörungen an diesem Tag sein.

Obwohl die GBAS- und GNSS-Empfänger jeweils GPS und GLONASS mit 20 Hz tracken, ist beim dynamischen Anwendungsfall (GNSS) an 3 Tagen eine deutlich erhöhte Anzahl von Cycle Slips beobachtbar. Diese Beobachtung entspricht der Erwartung, dass Phasenmessungen an dynamisch betriebenen Empfängern eine etwas schlechtere Qualität aufweisen.

Nicht erklärbar ist das Verhalten am 01.02.2007, bei dem am GNSS-Empfänger eine kleinere Anzahl von Cycle Slips detektiert wurde als an der Referenzstation. Rein aus der Anzahl von Cycle Slips könnte man annehmen, dass die Ergebnisse vertauscht wurden. Da dies ausgeschlossen werden konnte, liegt der Verdacht nahe,

- dass der Signalempfang an der Referenzstation an diesem Tag stärker gestört wurde
- dass der Signalempfang an Bord des Forschungsschiffs geringeren dynamischen Belastungen ausgesetzt war oder weniger gestört war

Letzteres wird jedoch durch die Ergebnisse der anderen ROVER **nicht** bestätigt.

Beim GRTK-Empfänger zeigt sich, dass die Gesamtanzahl von Cycle Slips auf GPS-Signalen mit denen vom GDLR und GGEG jetzt in der gleichen Größenordnung ist. Jedoch sind sie bei GPS vorrangig L1 zugeordnet. Die GLONASS-Signalen zugeordneten Cycle Slips, die ungefähr 60% der Gesamtanzahl ausmachen, sind auch hier verstärkt GLONASS L2 zugeordnet.

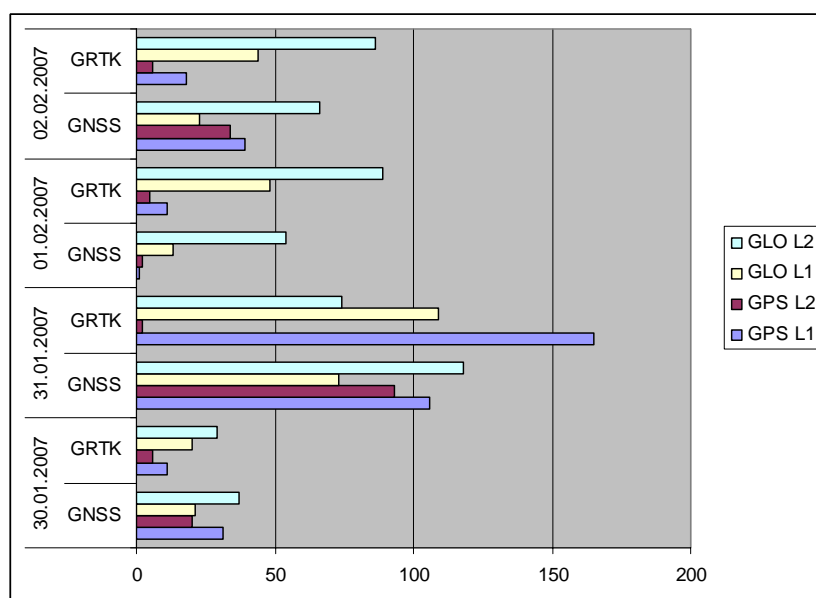


Fig. 4-1 Anzahl von Cycle Slips des GNSS und GRTK für eine Zeitauflösung von 0.1 s.

Beim GRTK-Empfänger liegt die Gesamtanzahl von Cycle Slips generell unter der vom GNSS-Empfänger. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Datenaufzeichnung nur mit 10 Hz erfolgte und damit eine näherungsweise Halbierung ihrer Anzahl erklärt werden könnte. Dann müsste es sich bei den Cycle Slips um an den Zwischenzeitpunkten fehlerhaft detektierte handeln. Keiner der in den Tab. 4-1 bis Tab. 4-3 vorgenommenen Vergleiche bestätigt diese Aussage. Um es zu überprüfen, wurden in Fig. 4-1 die Anzahl von Cycle Slips für GNSS und GRTK dargestellt, deren Zeitbezug einer Abtastrate von 10 Hz entspricht. Auch hier zeigt sich, dass eine direkte Erklärung aus der veränderten Abtastrate nicht gegeben ist.

- SF 2**
- An der Referenzstation GBAS werden im Mittel die geringsten Cycle Slips detektiert, insofern nur die Ergebnisse für GPS betrachtet werden. Bei der tageweisen Analyse ist diese Aussage für den 01.02.2007 nicht gültig.
 - Rein aus der Anzahl von Cycle Slips der ROVER-Empfänger pro Tag lässt sich kein gemeinsamer Tagesbezug erkennen.
 - Bei den ROVER-Empfängern besitzt der GNSS-Empfänger im Mittel die höchste Anzahl von Cycle Slips. Bei der tageweisen Analyse ist diese Aussage nicht für den 01.02.2007 gültig.
 - Obwohl GNSS und GRTK dynamisch an der gleichen Antenne betrieben wurden und jeweils auch GPS- und GLONASS-Signale empfangen und prozessieren, besitzen sie deutlich erkennbare Unterschiede in der Anzahl der detektierten Cycle Slips. Ein direkter Zusammenhang zur verwendeten Abtastfrequenz ist nicht nachweisbar. Ob die Qualität des angewendeten Detektionsverfahrens sinkt, wird im Zusammenhang mit dem Phasenrauschen in Kapitel 4.2 diskutiert.

4.1.2 Cycle Slips im Zeit- und Satellitenbezug

Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, empfiehlt sich eine Betrachtung der aufgetretenen Cycle Slips in Bezug auf die Zeit und ihre Satellitenzuordnung⁸ (siehe Fig. 4-2 bis Fig. 4-5). Für die Analyse werden folgende Thesen formuliert:

- Jeder Empfänger besitzt sein eigenes Offset zwischen Empfängerzeit und Systemzeit. Analysierte Phasenmessungen sind folglich bezüglich ihrer Werte und ihrer Veränderung als nicht identisch und damit nicht direkt vergleichbar anzunehmen.
- Werden Cycle Slips auf allen 4 ROVER(n) im gleichen Zeitbezug beobachtet, so sind mögliche Ursachen dafür ausbreitungsbedingte Signalstörungen oder erhöhte Dynamikanforderungen. Beide Effekte können dazu führen, dass beim Phasentracking reale Cycle Slips entstehen oder dass eine Fehldetektion in Folge schlecht modellierter Phasendynamik auftrat.
- Ein synchronisiertes Auftreten von detektierten Phasensprüngen auf allen parallel getrackten Satelliten eines Empfängers ist ein Indiz für aufgetretene Rücksetzoperationen des Empfängeruhrenfehlers, die in der Regel eine Millisekunde oder ein Vielfaches

⁸ Bei GLONASS entspricht PRN der aus dem Frequenzkanal abgeleiteten Identifikationsnummer. Diese kann durchaus für 2 Satelliten identisch sein.

davon betragen. Hier ist zu erwarten, dass solche Effekte nicht zeitlich synchronisiert auf mehreren Empfängern auftreten.

Am 30.01.2007 sind nur beim GNSS-Empfänger zeitlich synchronisierte Phasensprünge auf mehreren parallel getrackten Satelliten zu beobachten. Das vom CSD generierte Qualitätsflag der Phase zeigt in den Ergebnisfiles, dass es sich hier primär um die Korrektur eines Sprunges von 1 ms handelt. In den Folgeepochen werden manchmal zusätzlich kleinskalige Cycle Slips zur Ausgleichung detektiert. Die hier detektierten Cycle Slips entsprechen damit Unstetigkeiten in den Phasendaten, die in Folge der Uhrenrücksetzoperation des Empfängers entstehen. Es handelt sich damit nicht um Cycle Slips im technischen Sinne.

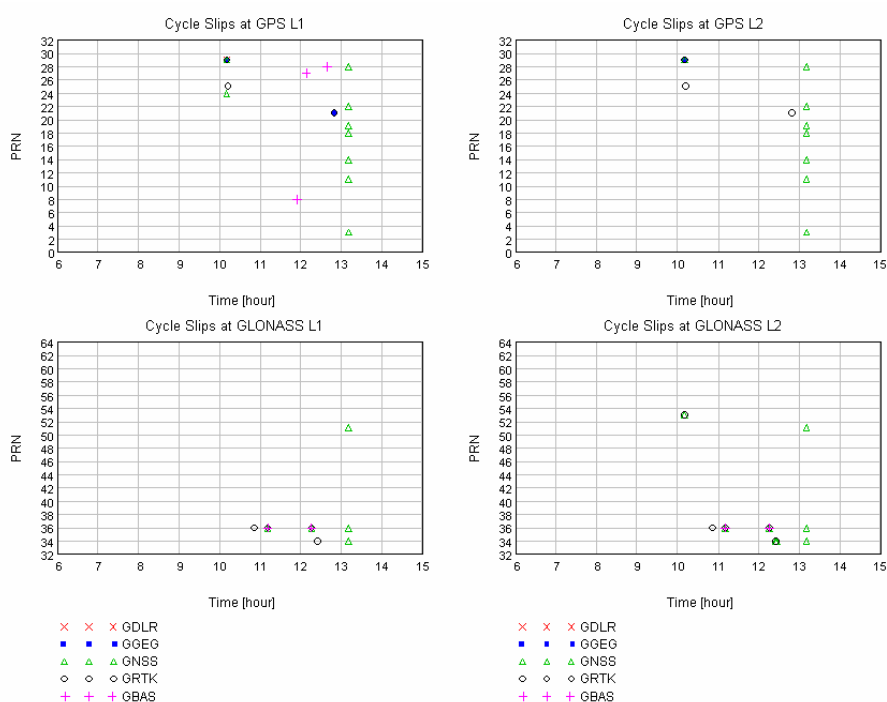


Fig. 4-2 Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 30.01.2007

Die anderen Cycle Slips sind vorwiegend singuläre Ereignisse. Cycle Slips, die bei mehreren Empfänger im nahezu gleichen Zeitbezug auftreten, sind bei den GPS-Satelliten 21 und 29 und bei den GLONASS-Satelliten 34, 36 und 53 zu beobachten.

Am 31.01.2007 treten zeitlich synchronisierte Phasensprünge auf mehreren parallel getrackten Satelliten sowohl beim GNSS- als auch beim GDLR-Empfänger auf. In allen Fällen ist auch hier die auslösende Ursache die Korrektur des Sprunges von 1 ms – also primär kein Cycle Slip im technischen Sinne.

Ein weiteres Phänomen ist die relativ hohe Häufigkeit von Cycle Slips am GRTK-Empfänger zwischen 8:00 und 10:00 Uhr insbesondere auf GPS L1 sowie GLONASS L1. Bei den GPS-Satelliten und den meisten GLONASS-Satelliten ist kein zeitlicher Bezug zu den anderen Empfängern erkennbar. Eine Ausnahme stellen die Cycle Slips bei den GLONASS-Satelliten mit der ID 36, 50 und 51 dar, die sowohl bei der Referenzstation (GBAS) als auch bei den ROVER(n) GRTK und GNSS detektiert wurden. Cycle Slips, die bei mehreren Empfänger im nahezu gleichen Zeitbezug auftreten, sind auch bei den GPS-Satelliten 1 und 29 zu beobachten.

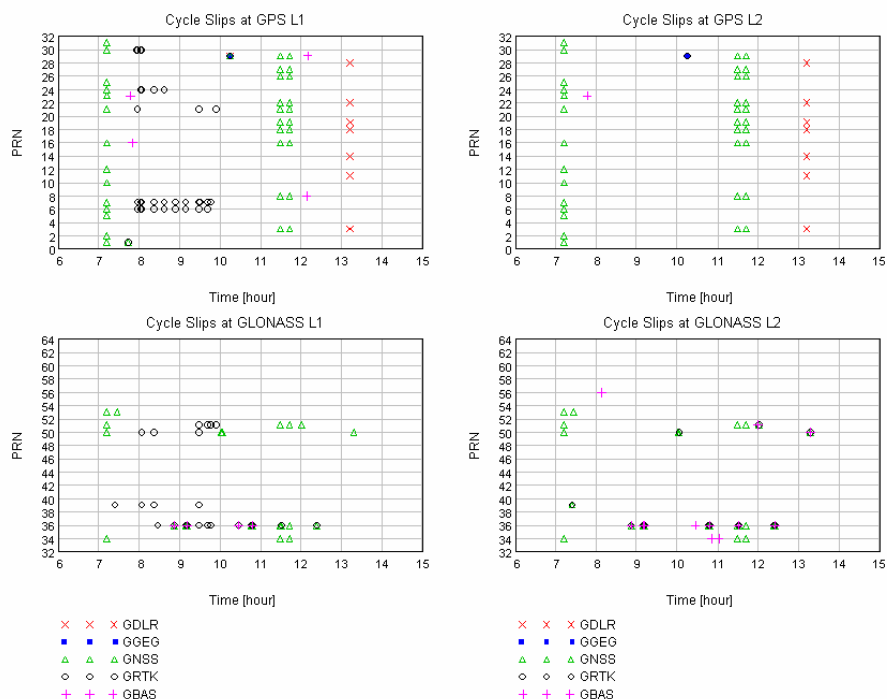


Fig. 4-3 Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 31.01.2007

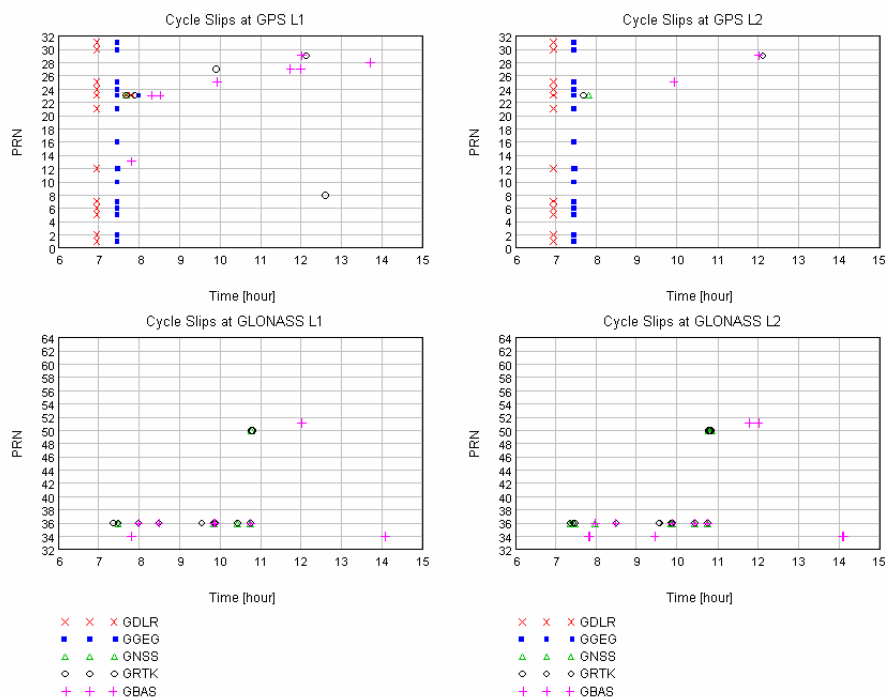


Fig. 4-4 Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 01.02.2007

Auch am 01.02.2007 sind zeitlich synchronisierte Phasensprünge zu beobachten, jedoch diesmal am GDLR- und GGEG-Empfänger. Hier gilt ebenfalls, dass sie in der Größenordnung von 1 ms sind und damit primär der Uhrenrücksetzoperation zuzuordnen sind. In den

meisten Fällen handelt es sich bei den Cycle Slips wieder um singuläre Ereignisse. Cycle Slips, die bei mehreren Empfängern im nahezu gleichen Zeitbezug auftreten, sind bei den GPS-Satelliten 23 und 29 und bei den GLONASS-Satelliten 36 und 60 zu beobachten.

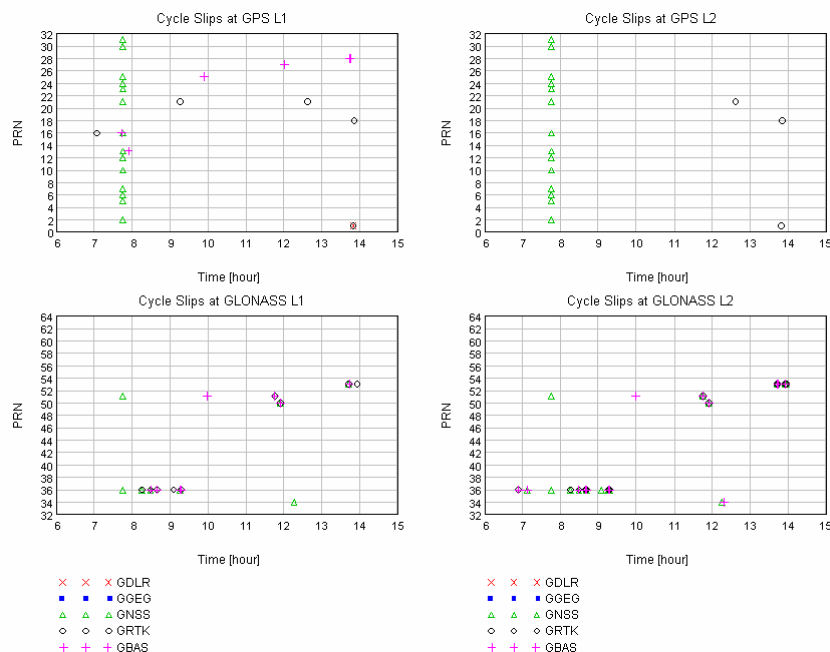


Fig. 4-5 Zeitliche und satellitenspezifische Zuordnung der Cycle Slips am 02.02.2007

Phasensprünge der Größenordnung 1 ms werden am 02.02.2007 am GNSS-Empfänger beobachtet. Cycle Slips, die bei mehreren Empfänger im nahezu gleichen Zeitbezug auftreten, sind bei den GPS-Satelliten 1 und 16 und bei den GLONASS-Satelliten 36, 50, 51 und 53 zu beobachten. Alle anderen Cycle Slips sind eher als Einzelereignisse zu interpretieren.

SF 3

- Phasensprünge in Folge von Uhrenrücksetzoperationen werden beim GNSS-, GDLR- und GGEG-Empfänger beobachtet. Eine zeitliche Korrelation ihres Auftretens an unterschiedlichen Empfängern kann nicht beobachtet werden. Dies liegt in der empfängerautonomen Größe und Handhabung von Empfängeruhrenfehlern begründet.
- Dass bei der Referenzstation keine Uhrenrücksetzoperationen auftreten, ist in der Verwendung eines externen Frequenznormals begründet. Beim GRTK, dessen Position und damit sein Empfängeruhrenfehler mit Hilfe der Daten der Referenzstation bestimmt werden, ist anzunehmen, dass die Stützung auch das Weglaufen der GRTK-Empfängeruhr verhindert und damit Rücksetzoperationen nicht auftreten.
- Bei den GPS-Signalen sind Cycle Slips primär Einzelereignisse. Bei den ROVER(n) sind Cycle Slips, die im gleichen Zeitbezug auf mehreren Empfängern detektiert wurden, eher die Ausnahme (nur PRN 29 an 3 aufeinander folgenden Tagen).
- Ein näher zu untersuchender Sonderfall ist das Verhalten des GRTK-Empfängers am 31.01.2007, bei dem gehäuft Cycle Slips zwischen 8:00 und 10:00 Uhr auftraten.

- Bei den GLONASS-Signalen ist ein gehäuftes Auftreten von Cycle Slips am Satelliten mit der Identifikationsnummer 36 an allen Tagen und an allen Empfängern, die GLONASS-Signale verarbeiten, zu erkennen. Hier liegt der Verdacht nahe, dass das ausgestrahlte Signal von minderer Qualität ist.

4.1.3 Cycle Slips in Relation zum CSD-Trackingprotokoll

Der für die Detektion verantwortliche Cycle Slip Detektor erzeugt als ein Nebenprodukt ein so genanntes Tracking-Protokoll (Availability.dat), in dem die Zeitmarken der ersten und der letzten Phasenmessung für ein zusammenhängendes Phasensegment angegeben werden. Zusammenhängend meint hier, dass weniger als 6 Cycle Slips oder 6 Nulleinträge in Folge auftreten. Anderenfalls wird durch den CSD ein Neustart initiiert. Die gemeinsame Darstellung von Cycle Slips und Tracking-Protokoll liefert ein Indiz dafür, zu welchen Zeitpunkten die Phasenqualität und –Verfügbarkeit eingeschränkt waren.

In Fig. 4-6 und Fig. 4-7 sind die Ergebnisse der Referenzstation für alle Messtage für GPS und GLONASS dargestellt, wobei nur die Messzeiträume betrachtet wurden, für die auch die ROVER-Empfänger in Betrieb waren (farblich unterlegt).

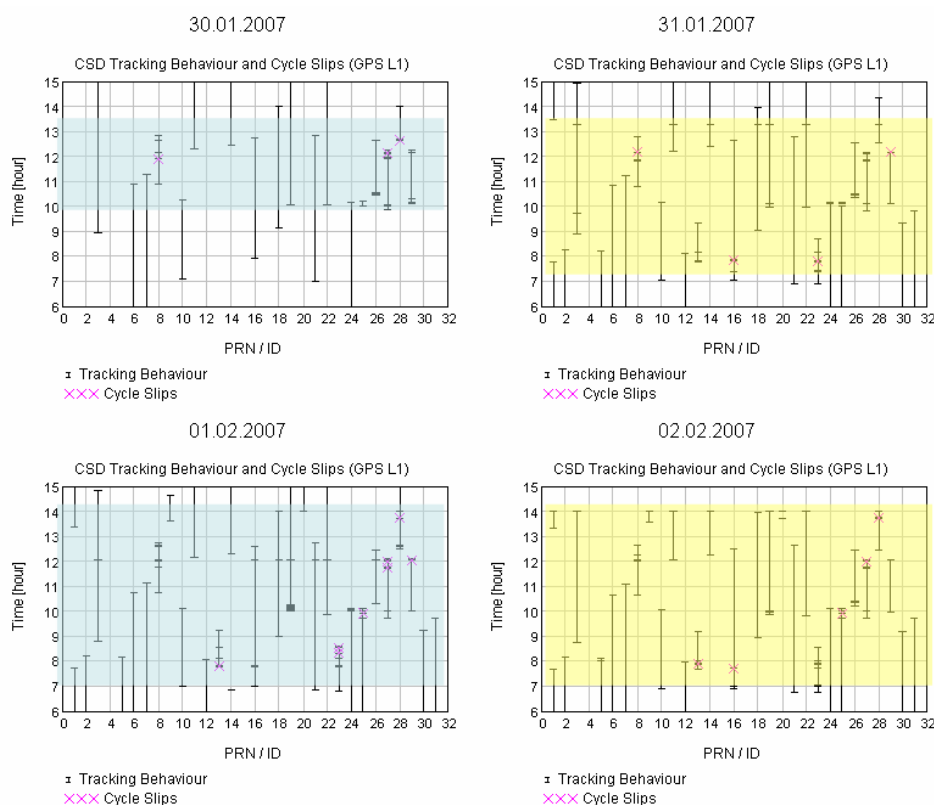


Fig. 4-6 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für GBAS-Empfänger (GPS L1)

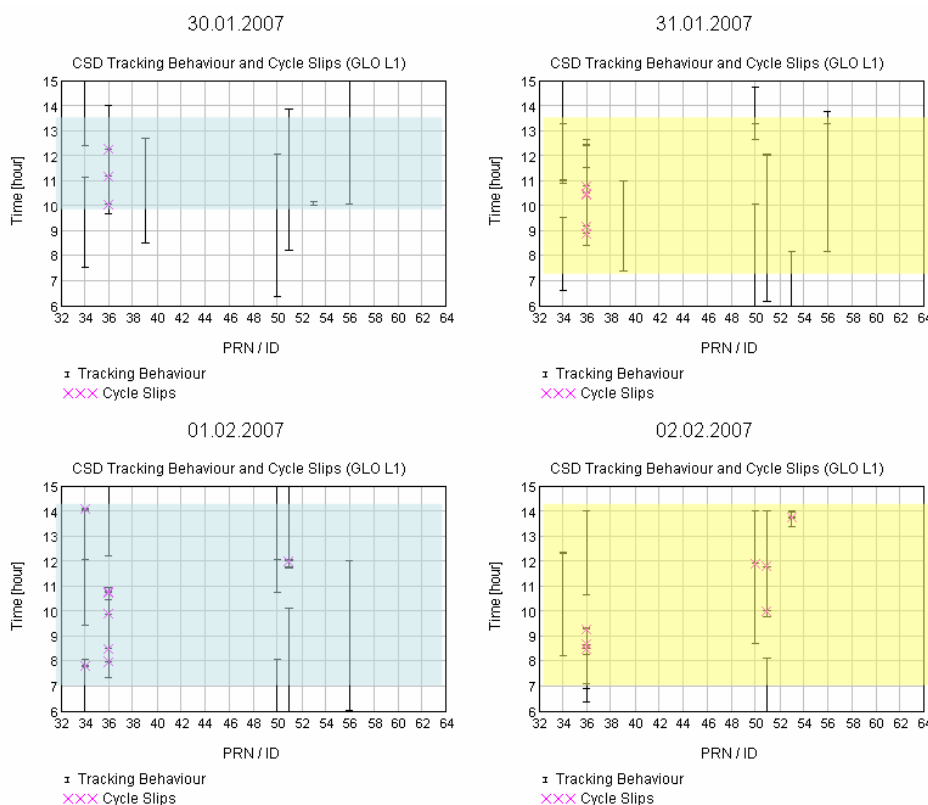


Fig. 4-7 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für GBAS-Empfänger (GLONASS L1)

Bereits aus dieser Gegenüberstellung für die Referenzstation (Fig. 4-6) wird ersichtlich, dass für die meisten Satelliten die L1-Phasen von GPS qualitativ hochwertig und kontinuierlich an allen Tagen bereitgestellt werden:

- PRN: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 14, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 30 und 31

Satelliten mit einer relativ niedrigen Trackingdauer können als Satellitendurchgänge unter geringen Elevationswinkeln und damit auch geringerer Phasenqualität aufgefasst werden. Gleiches gilt für Satelliten eine Stunde nach Satellitenaufgang oder vor Satellitenuntergang. Die erklärable Folge sind Datenlücken aber auch Cycle Slips, die aber nicht zwangsläufig auftreten müssen.

- PRN: 3, 8, (9), 13, (17), (20), 23, 26, 27, 29

Sonderfälle, denen umgebungsbedingten Signalstörungen zugeordnet werden könnten, sind am PRN 16 und 28 zu beobachten. Beim PRN 16, treten ca. 1 h nach Satellitenaufgang eine Unterbrechung und am 31.01. und 02.02. Cycle Slips auf. Die Systematik ist ein Indiz dafür, dass eine umgebungsbedingte Signalstörung vorliegt. Beim PRN 28 ist ähnliches zu beobachten.

Das geschätzte Phasenrauschen sowie das vom CSD generierte Statusflag sind in Fig. 4-8 für alle 4 Tage dargestellt. Am 30.01. beginnt die Datenaufzeichnung bei einem Elevationswinkel von 5°. Um 8:00 Uhr wird dann das Signal bereits unter einem Elevationswinkel von 25° getrackt. In diesem Zeitraum ändert sich der Azimutwinkel von 289° bis 296°. Die durch die Statusflags (=0) deutlich erkennbaren Neustarts des CSD werden in nur 2 Fällen durch detektierte Cycle Slips ausgelöst (erkennbar daran, dass vorher Statusflag 1 war). Bei den anderen Fällen entstehen sie durch länger fehlende Daten, denen aber jedes Mal ein erhöhtes Phasenrauschen vorausgegangen ist. Richtungsabhängig wird dieser Signalempfang durch Schiffe gestört, die den Überseehafen auf dem Weg in die Warnow oder zum Fährter-

minal passieren. Damit ist es auch nicht verwunderlich, dass hier kein strenger Zeitversatz um -4 Minuten an Folgetagen beobachtet wird. Auf Lokalzeit bezogen korrelieren aber alle Ereignisse mit dem Einlaufzeitpunkt der Scandline-Fähre.

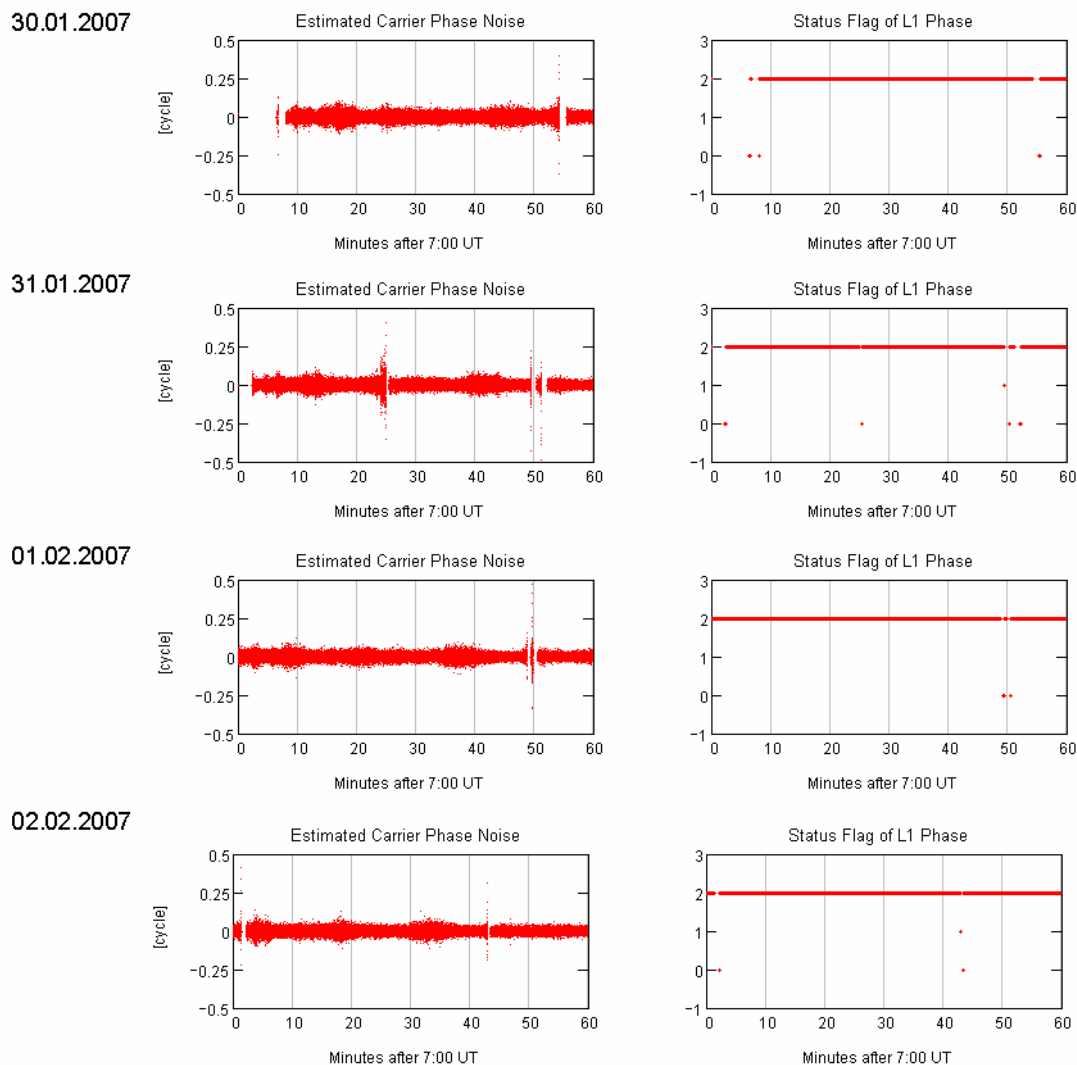


Fig. 4-8 Phasenrauschen und Statusflag für PRN 16 an der Referenzstation

Das Satellitensignal vom PRN 28 wird am 30.01.2007 um 13:00 UT unter einem Elevationswinkel von 12° und einem Azimutwinkel von 332° getrackt. Um 14:00 UT beträgt der Elevationswinkel knapp 25° und der Azimutwinkel 308°. Dieser Signalempfang „scannt“ folglich die Einfahrt von Schiffen in den Überseehafen. Erhöhtes Phasenrauschen tritt an allen 4 Tagen zwischen 13:30 UT und 14:00 UT auf, jedoch mit unterschiedlicher Intensität und Auswirkung. So ist am 30.01. eine Erhöhung des Phasenrauschens erkennbar, dass aber kleiner als 0.25 cycle bleibt. Es werden weder Cycle Slips detektiert noch ein Neustart in Folge fehlender Daten notwendig. Am 31.01. fehlen Daten ca. 13:18 UT, so dass ein Neustart notwendig wird. Erhöhtes Phasenrauschen ohne Auswirkung auf den Signalempfang oder die Datenprozessierung ist dagegen 13:55 Uhr zu beobachten. Am 01. und 02.02. tritt dagegen deutlich erhöhtes Phasenrauschen auf, das die Detektion von Cycle Slips und den Neu-

start des CSD zur Folge hat. Störungen, die gegen 13:45 UT auftreten, lassen sich auch in diesem Fall mit dem Einlaufen der Scandline-Fähre in Zusammenhang bringen.

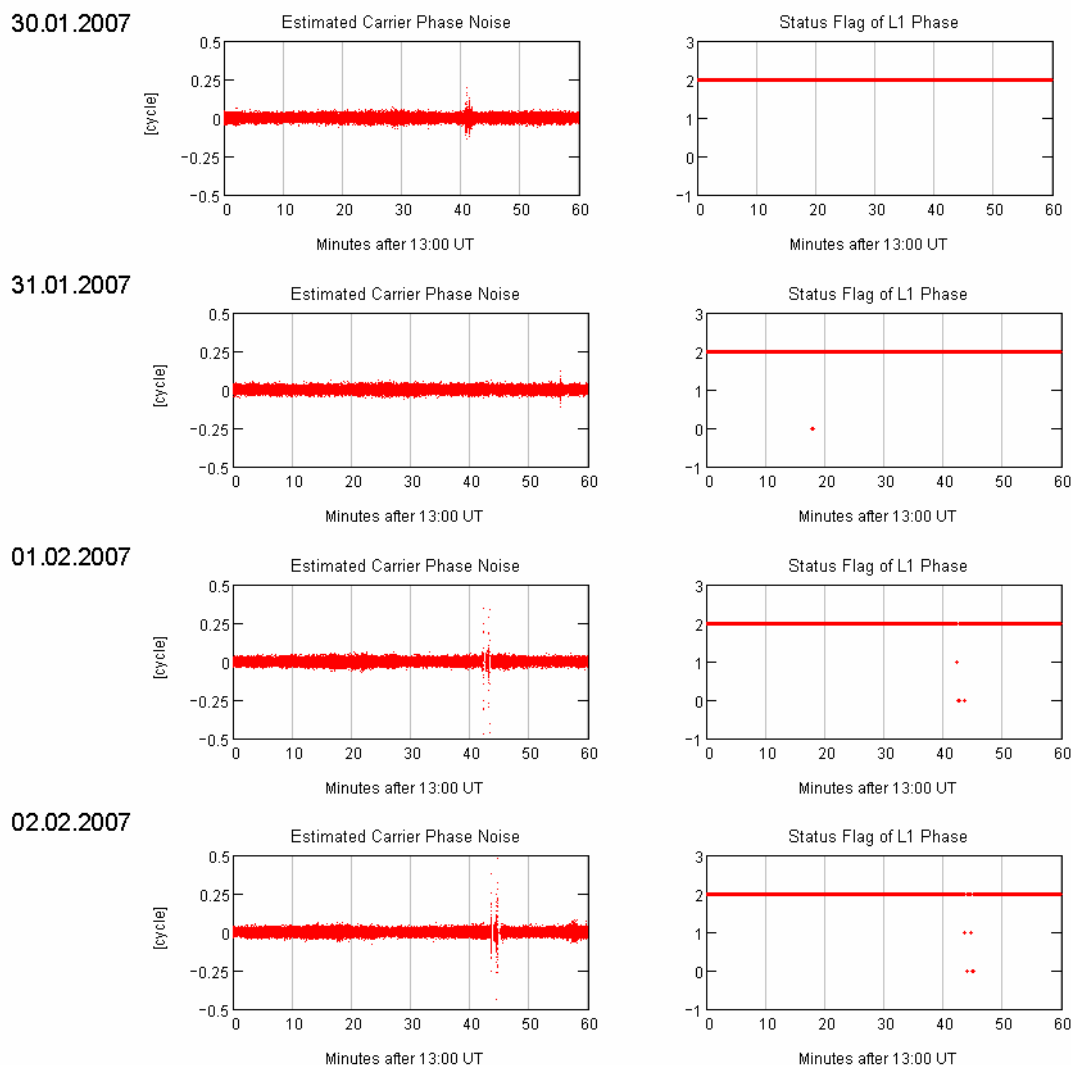


Fig. 4-9 Phasenrauschen und Statusflag für PRN 28 an der Referenzstation

Betrachtet man die GLONASS-Signale im oberen L-Band (Fig. 4-7), so ist in die Analyse einzubeziehen, dass während der 4 Messtage zweimal die GLONASS-Satellitenkonstellation geändert wurde (Außerbetriebnahme und Inbetriebnahme von Satelliten). Eine direkte Vergleichbarkeit der GLONASS-Ergebnisse ist damit nicht gegeben. Man kann aber deutlich feststellen, dass die meisten Cycle Slips am GLONASS-Satelliten mit der Identifikationsnummer 36 detektiert wurden.

Bei den ROVER-Empfängern, die an der gleichen Antenne betrieben wurden, empfiehlt sich ein tageweiser Vergleich. Eine Spurtreue bzgl. der Trajektorien und damit vergleichbare Empfangsbedingungen kann jedoch an Folgetagen nicht angenommen werden.

Bei den GPS-Signalen wird am 30.01.2007 deutlich (Fig. 4-10), dass alle 4 ROVER ein vergleichbares Tracking-Verhalten aufweisen. Mit Ausnahme der synchronisierten Cycle Slips am GNSS sind alle anderen Cycle Slips als Einzelereignisse einzustufen, die bei niedrigen Elevationswinkeln auftreten.

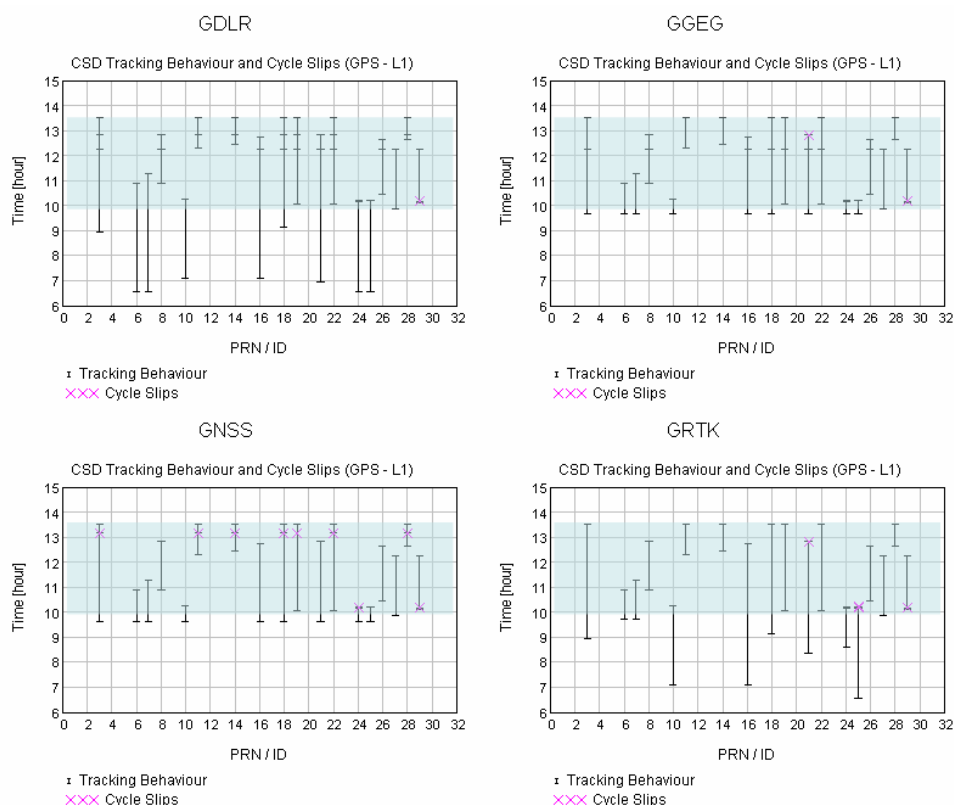


Fig. 4-10 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 30.01.2007)

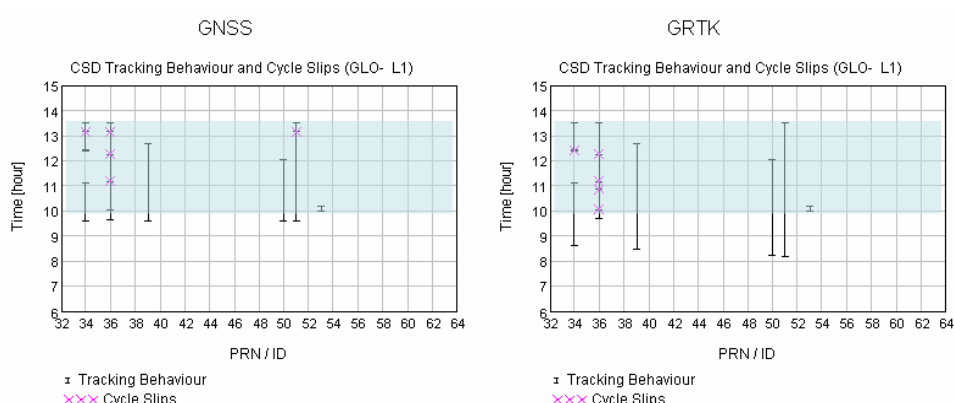


Fig. 4-11 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 30.01.2007)

Auch bei den GLONASS-Signalen (Fig. 4-11) ist ein vergleichbares Tracking-Verhalten erkennbar. Cycle Slips treten entweder bei niedrigen Elevationswinkeln auf oder sind wie bereits bei der Referenzstation dem GLONASS-Satelliten mit der Identifikationsnummer 36 zuzuordnen.

In Fig. 4-12 und Fig. 4-13 sind die Ergebnisse der ROVER für den 31.01.2007 für GPS L1 und GLONASS L1 dargestellt.

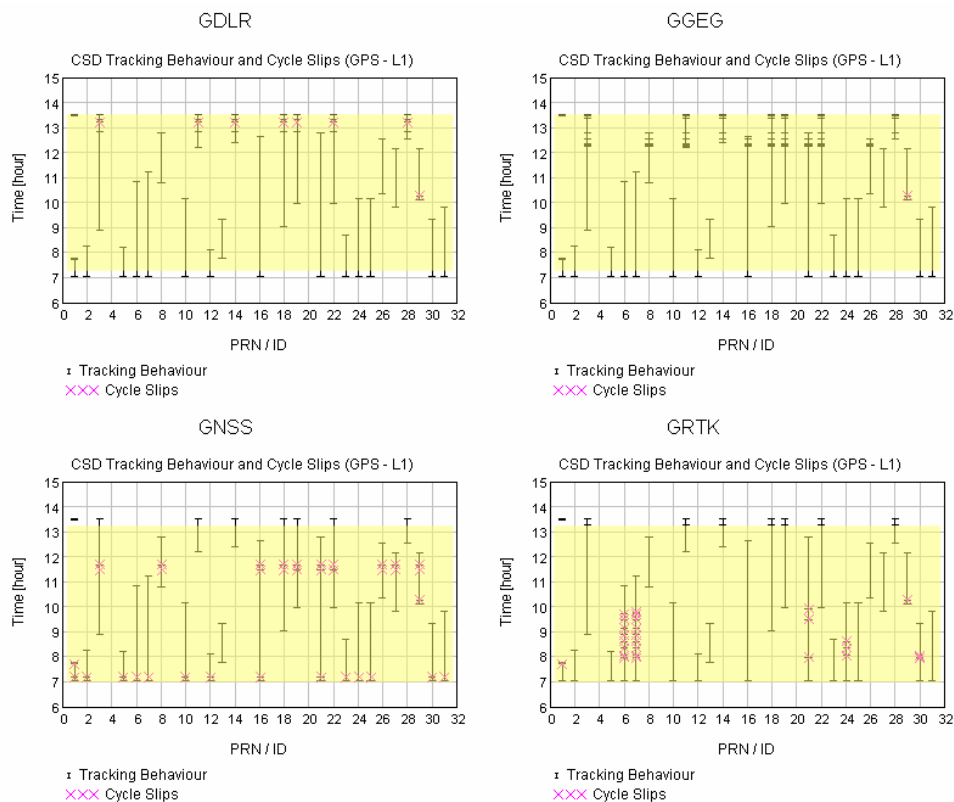


Fig. 4-12 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 31.01.2007)

Bereits bei Betrachtung der GPS-bezogenen Ergebnisse zeigt sich, dass hier neben den Phasensprüngen der Uhrenrücksetzoperation (GNSS, GDLR) und den Cycle Slips bei niedrigen Elevationswinkeln noch näher zu untersuchende Effekte in den GPS-Signalen des GRTK auftreten. Diese betreffen die Sequenzen von Cycle Slips beim PRN 6, 7, 21, 24 und 30. Bei den anderen ROVER(n) sind die Phasensmessungen als kontinuierlich und fehlerfrei eingestuft, so dass externe Ursachen auszuschließen sind. Dieser Effekt kann folglich verfahrensbedingt (geringere Abtastfrequenz) oder eine Eigenheit des GRTK-Empfängers sein. Eine nähere Analyse erfolgt im Zusammenhang mit dem Phasenrauschen in Kapitel 4.2.

Bei den GLONASS-Signalen (Fig. 4-13) ist ein ähnlicher Effekt bei den Satelliten mit der ID 39, 50 und 51 zu beobachten. Hier werden Phasensprünge auch nur am GRTK detektiert, während die Messungen beim GNSS als kontinuierlich und fehlerfrei eingestuft sind. Es kann also festgestellt werden, dass diese Cycle Slips eine empfänger- oder verfahrensspezifische Ursache haben müssen.

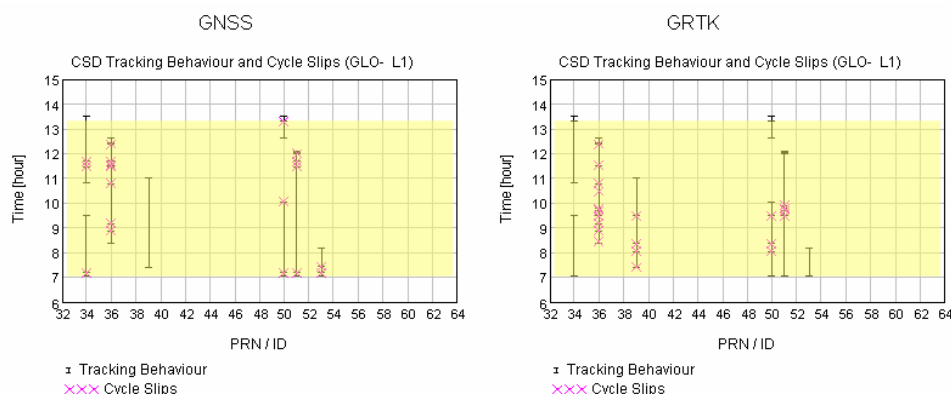


Fig. 4-13 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 31.01.2007)

Phasensprünge in den GPS-Signalen können am 01.02.2007 vorwiegend den Uhrenrücksetzoperationen (GDLR, GGEG) und niedrigen Elevationswinkeln zugeordnet werden (siehe Fig. 4-14).

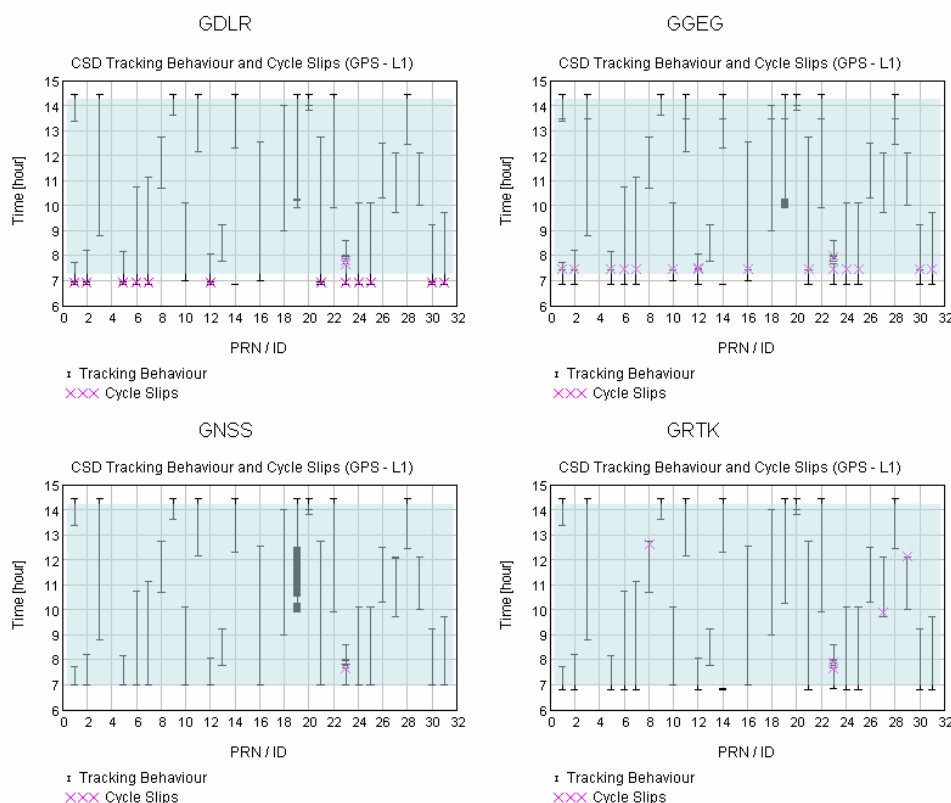


Fig. 4-14 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 01.02.2007)

Obwohl PRN 19 in den GPS NANU Messages [Ref 4] als „unhealthy“ gesetzt war (GPS Zeit 7:39 – 12:01), werden durch alle ROVER-Empfänger Phasennesswerte bereitgestellt (Fig. 4-14). Lediglich beim GNSS-Empfänger ist ein extrem gehäuftes Auftreten von Neustarts des CSD zu beobachten. Ihre Ursache sind Kurzzeitsequenzen von auf Null gesetzten Phasenwerten im RINEX-File des GNSS-Empfängers. Das geschätzte Phasenrauschen sowie die Statusflags der L1 Phase verdeutlichen die Unterschiede in der bereitgestellten L1 Phasennessung (siehe Fig. 4-15).

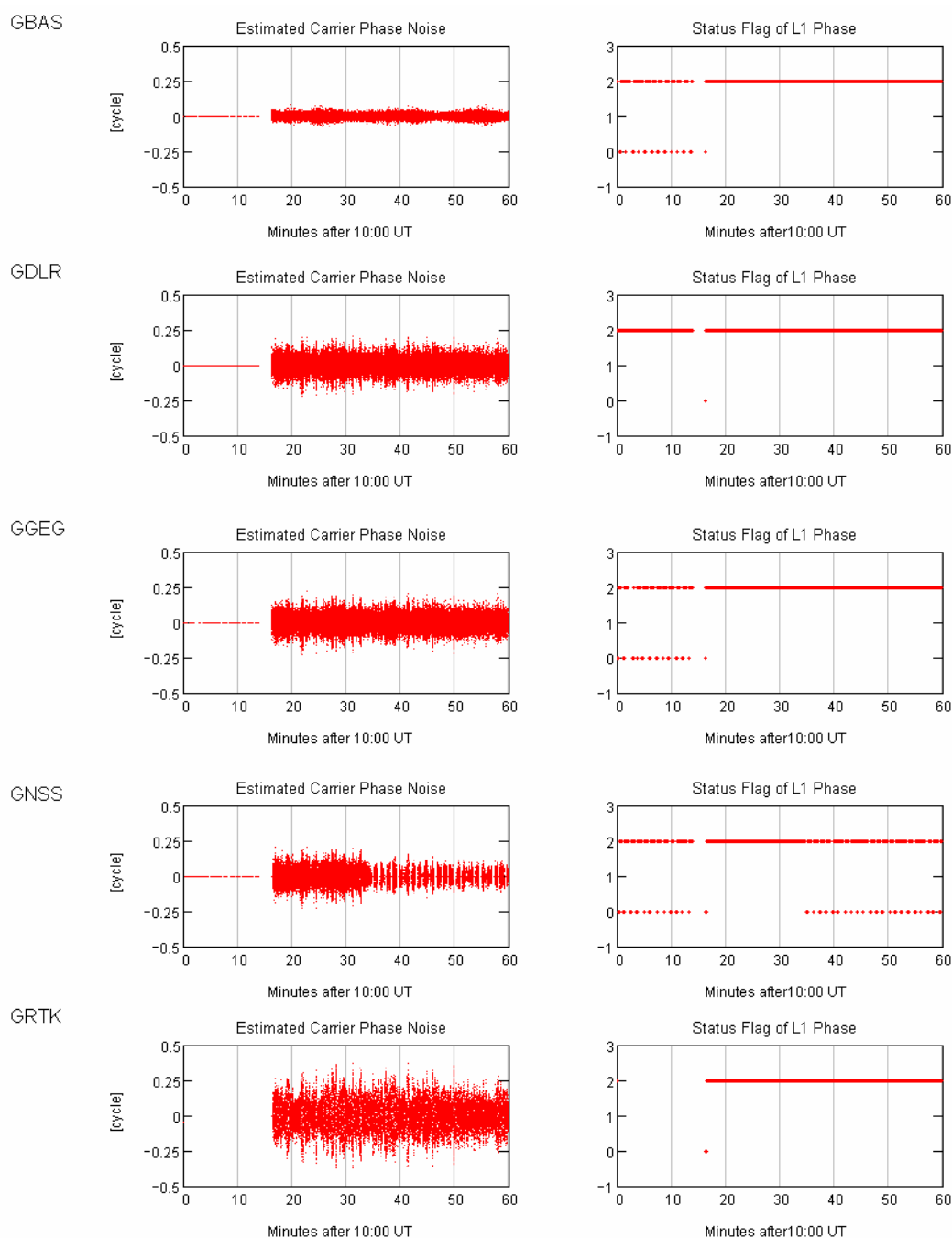


Fig. 4-15 Phasenrauschen und Statusflag für PRN 19 an der Referenzstation und den ROVER(n) am 01.02.2007

Beim PRN 23 sind erstmals bei allen 4 ROVER(n) Diskontinuitäten in den L1-Phasenmessungen im gleichen Zeitbezug erkennbar, die durch Auftreten von Cycle Slips und Restarts des CSD charakterisiert sind. Interessanterweise ist auch in den Messungen der Referenzstation ein ähnliches, diskontinuierliches Verhalten zu beobachten. Um 7.50 UT wird der Satellit unter einem Elevationswinkel von 10° und einem Azimutwinkel von 335° getrackt. Der Beobachtungszeitpunkt an der Referenzstation korreliert mit dem Einlaufen der Scandline-Fähre. Die ROVER-Messungen sind dagegen durch Ausbreitungseffekte an den Werftaufbauten gestört.

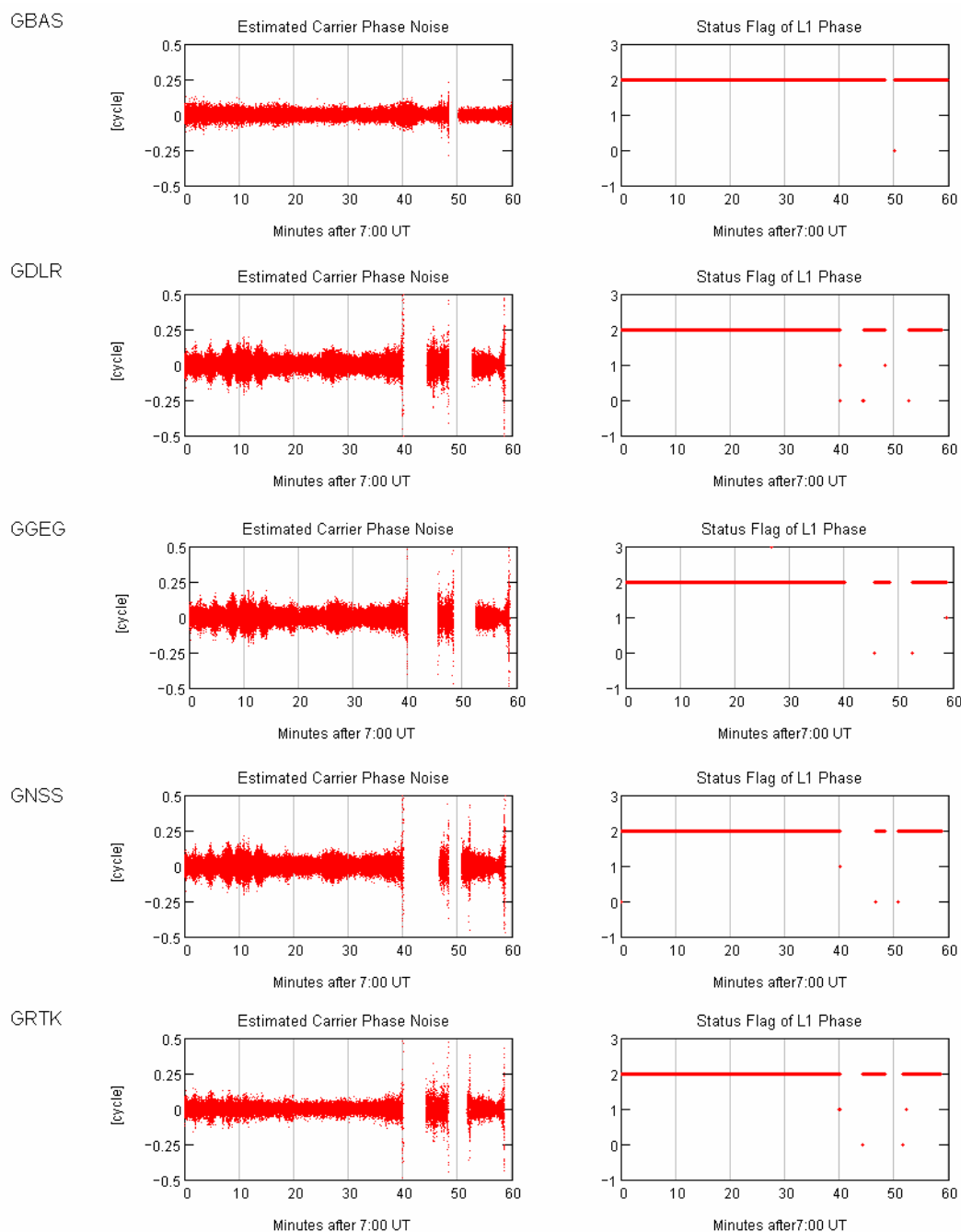


Fig. 4-16 Phasenrauschen und Statusflag für PRN 23 an der Referenzstation und den ROVER(n) am 01.02.2007

Bei GLONASS werden Cycle Slips beim Satelliten mit der Identifikationsnummer 50 bei niedrigen Elevationen und wiederum gehäuft beim Satelliten mit der ID 36 beobachtet (siehe Fig. 4-17).

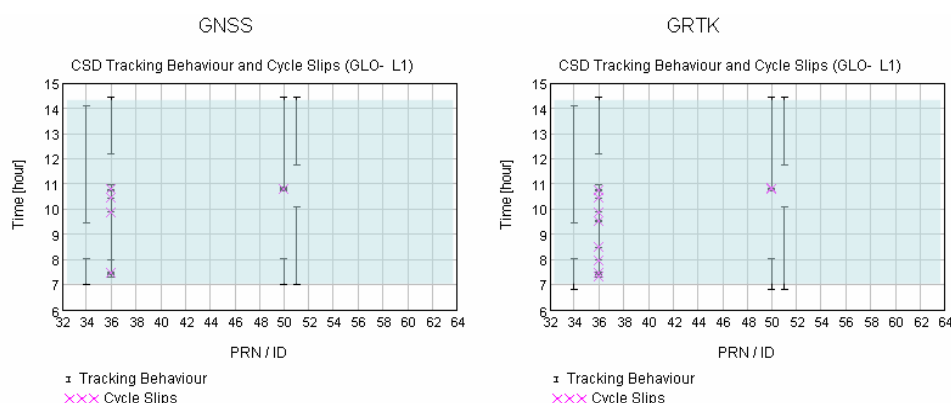


Fig. 4-17 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 01.02.2007)



Fig. 4-18 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GPS L1, 02.02.2007)

Am 02.02.2007 sind detektierte Phasensprünge bei den GPS-Signalen vereinzelt auftretende Ereignisse (Fig. 4-18), die überwiegend niedrigen Elevationswinkeln zugeordnet sind. Die häufigen Restarts auf allen getrackten Satelliten des GGEG-Empfängers sind ein Ergebnis von im RINEX-File fehlenden Dateneinträgen. Für den beim PRN 21 in den GRTK-Phasenmessungen ausgewiesene Cycle Slip ist eher ein empfängerspezifisches Verhalten anzunehmen, da bei den anderen ROVER(n) die L1-Phasenmessungen als kontinuierlich und fehlerfrei eingestuft sind.

In den GLONASS-Phasenmessungen (Fig. 4-19) zeigt sich erneut, dass beim Satelliten mit der ID 36 ein gehäuftes Auftreten von Neustarts des CSD und von Cycle Slips zu beobachten ist. Da dieses Verhalten unabhängig vom Empfänger und vom betrachteten Tag auftritt, ist von einer geringeren Signalqualität auszugehen. Bei den GLONASS-Satelliten mit der ID

50 und 51 sind um 12 Uhr Diskontinuitäten (Neustart, partiell mit Cycle Slips) bei beiden ROVER-Empfängern als auch beider Referenzstation (siehe Fig. 4-7) zu erkennen. Ob es sich um eine ausbreitungsbedingte Störung handelt oder ob eine temporär geringere Signalqualität die Ursache dafür ist, bedarf der Betrachtung anderer Phasenqualitätsparameter.

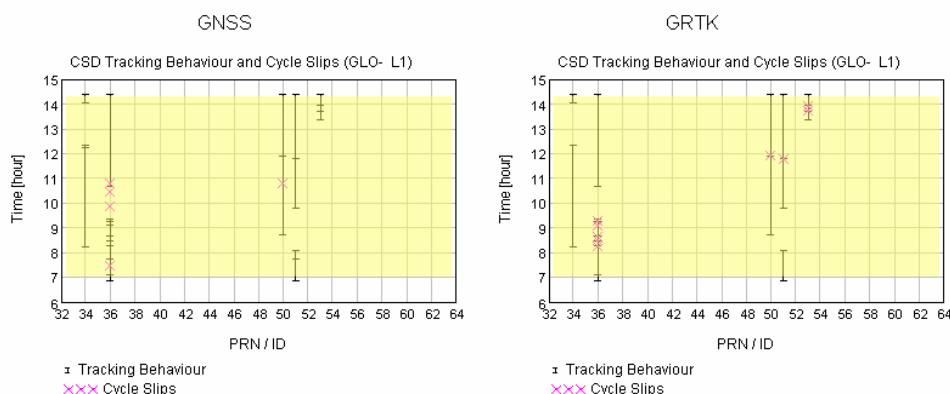


Fig. 4-19 Cycle Slips und Tracking-Protokoll für ROVER-Empfänger (GLONASS L1, 02.02.2007)

Da keine gravierenden Unterschiede zwischen den L1- und L2-Ergebnissen beobachtet werden konnten, wird auf ihre Darstellung und Interpretation verzichtet.

SF 4

Alle Empfänger wurden mit einer Elevationsmaske von 5° betrieben. Die Detektion von Phasensprüngen bei niedrigen Elevationswinkeln ist plausibel und lässt sich mit der erhöhten Phasendynamik und dem erhöhten Phasenrauschbudget allgemein erklären.

Eine Betrachtung der Signalqualität und der Signalstärke empfiehlt sich bei folgenden Effekten:

- Beim PRN 16 und 28 werden bei der Referenzstation am 30.01.2007 Diskontinuitäten beobachtet, die sich vergleichbaren Empfangsbedingungen an Folgemessungen zuordnen lassen. Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Signalstörungen als Mehrwegeeffekte auf Phasen können.
- Die Daten des GLONASS-Satelliten mit der ID 36 sind bei allen Empfängern während der gesamten Messkampagne als instabil eingestuft.
- Beim GRTK-Empfänger werden Sequenzen von Cycle Slips bei mehreren GPS-Satelliten zwischen 8:00 und 10:00 UT am 31.01.2007 beobachtet. Dies wird später im Zusammenhang mit dem Phasenerauschen geklärt.
- Am 01.02. werden für den GPS-Satelliten 19 Phasenmessungen durch alle Empfänger ausgegeben, obwohl er in den NANU-Messages als „unhealthy“ gesetzt war. Dazu muss bemerkt werden, dass an der Referenzstation bis 10:20 UT konstante Phasen- und Rangewerte geliefert werden, wobei letztere bezüglich des erwarteten Wertebereiches nicht plausibel sind (Range= 42949672.940 m). Danach werden die Phasen als qualitativ hochwertig eingestuft.

- An den ROVER(n) sind deutliche Unterschiede in den Rohdaten enthalten. Nur in den vom GNSS gelieferten Phasenwerten werden gehäuft Neustarts des CSD beobachtet. Diese entstehen in Folge von nicht bereitgestellten Phasenwerten, während bei den anderen ROVER(n) eine kontinuierliche Bereitstellung von Phasenwerten erfolgt. Es handelt sich folglich um einen empfängerbedingten Effekt und nicht um eine Signalstörung.
- Am 01.02. sind erstmals bei allen 4 ROVER(n) Diskontinuitäten in den L1-Phasenmessungen kurz vor 8:00 UT erkennbar.
- Die am 02.02. bei den GLONASS-Satelliten 50 und 51 um 12 Uhr beobachtete Instabilität bedarf einer Betrachtung der Signalqualität.

4.2 Rauschen der Trägerphasen

Der Rauschanteil der Trägerphasen wird mit Hilfe des CSD für die L1- und L2-Trägerphase unabhängig bestimmt [Ref 2]. Dies ist nur möglich, wenn hochratige Messwerte zur Verfügung stehen und damit der Modellierungsfehler der Phasendynamik klein gehalten werden kann. Es kann folglich nicht sicher ausgeschlossen werden, dass das geschätzte Phasenrauschen durch Signalausbreitungseffekte oder Nutzerdynamik mit beeinflusst ist.

4.2.1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Phasenrauschens⁹

Stationsbezogene Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen werden nur auf der Grundlage von GPS-basierten Messwerten generiert. Das ermöglicht eine Vergleichbarkeit zwischen allen Empfängern.

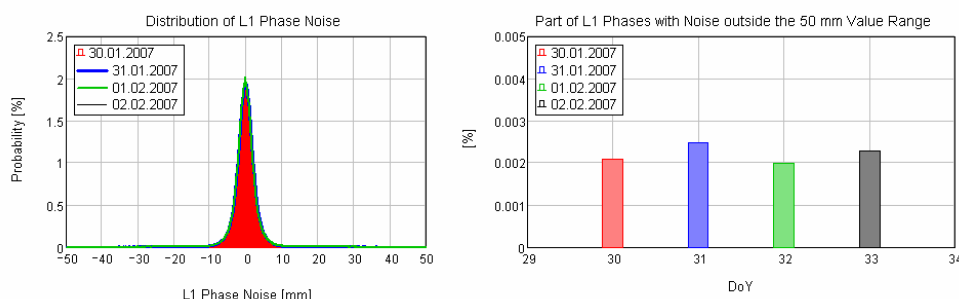


Fig. 4-20 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens an der Referenzstation sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches

Für die Referenzstation standen vom 30.01. bis 01.02.2007 vollständige Tagesdatensätze zur Verfügung. Am 02.02.2007 wurde der Messbetrieb nach 15 Uhr abgebrochen. Damit ist eine direkte Vergleichbarkeit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nur für 3 Tage gegeben. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion werden diskret für einen vorgegebenen Wertebereich von {-50 mm, + 50 mm} bestimmt. Phasenrauschwerte außerhalb dieses Bereiches werden nur gezählt und sind in Relation zur Gesamtanzahl der ausgewerteten Phasenrauschwerte setzbar. Die für die Referenzstation bestimmten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des L1 Phasenrauschens sind in Fig. 4-20 dargestellt.

⁹ Die in diesem Kapitel erzeugten Grafiken wurden auf der Grundlage der L1noise.dat mit Hilfe von NoiseDistribution.xmcd erzeugt. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen werden aus dem geschätzten Phasenrauschen pro Messzeitpunkt bezogen auf die Gesamtmeßzeit und alle getrackten Satelliten generiert..

Bei der stationsbezogenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sind keine signifikanten Tagesunterschiede erkennbar, obwohl am 02.02. nur eine Teilstatistik generiert wurde. Der Anteil von Phasenrauschwerten, der außerhalb des 50 mm Wertebereiches lag, ist generell unter 0.003 %. Damit ist auch nachgewiesen, dass die dargestellten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen repräsentativ sind.

Fig. 4-21 zeigt die pro Satellit und Tag bestimmten Standardabweichungen des Phasenrauschens bei GPS, die an den Tagen mit vollständiger Datenbasis sich nur im Submillimeterbereich voneinander unterscheiden.

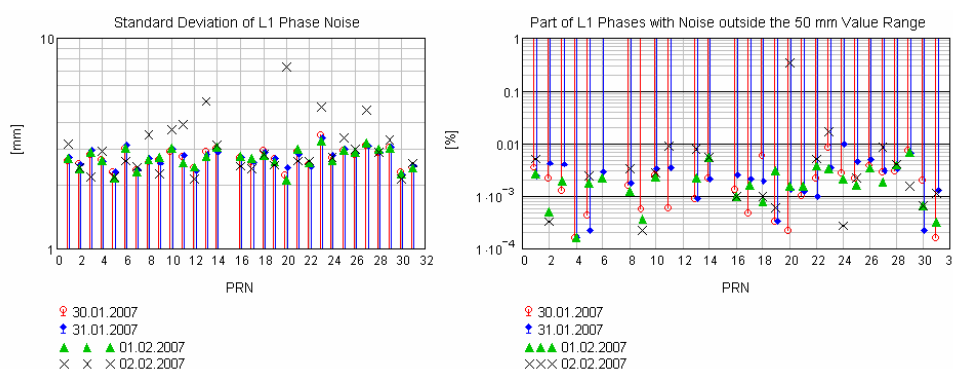


Fig. 4-21 Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches

Die deutlich erkennbaren Abweichungen am 02.02.2007 sind eine Folge der reduzierten Datenbasis. Das wird erkennbar, wenn die Differenz der Standardabweichungen an Folgetagen in Relation zur Differenz der Datensamples pro Satellit gesetzt wird (Fig. 4-22).

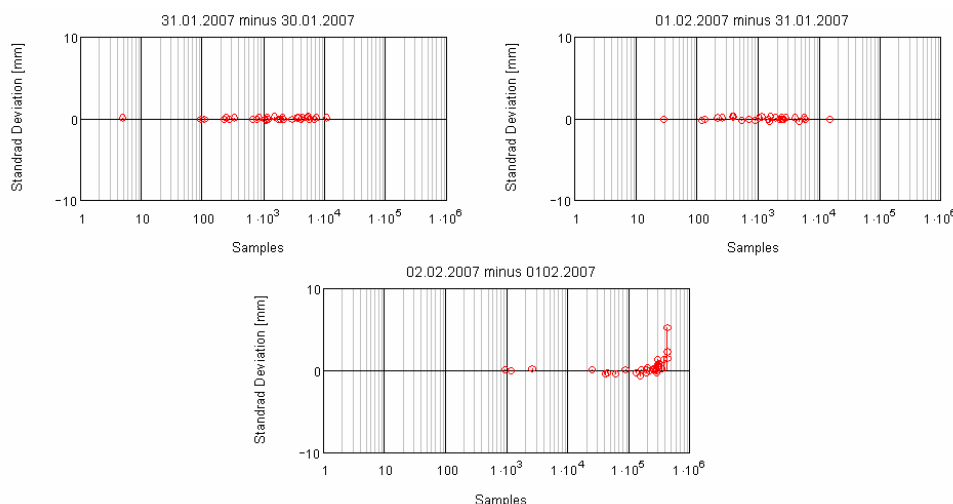


Fig. 4-22 Unterschiede der bestimmten Standardabweichungen des Phasenrauschens an Folgetagen in Relation zu Unterschieden in der ausgewerteten Datenbasis

Unterschiede in der Datenbasis können bei vollständigen Messtagen bis zu 10.000 Samples betragen. Bereits 5000 Samples lassen sich bei 20 Hz allein durch die Differenz zwischen solaren Tag und Sternentag erklären, um die sich der Signalempfang täglich bei GPS nach vorn verschiebt. Ermittelte Standardabweichungen variieren bis maximal 0.3 mm voneinander. Bei der unteren Grafik, die sich auf den 01. und 02.02.2007 bezieht, zeigt sich, dass steigende Unterschiede in der Datenbasis größere Abweichungen in den bestimmten Standardabweichungen zur Folge haben, die dann durchaus bis zu 5 mm betragen können.

Eine Interpretation der satellitenspezifischen Standardabweichungen in Bezug auf die Signalqualität ist folglich nur bei Abweichungen größer 1 mm und bei Analyse der gleichen Datenbasis angebracht. Eine vergleichbare Datenbasis kann angenommen werden, wenn die Messzeiträume und die Updatenraten der Daten identisch sind.

Derartige Unterschiede gibt es jedoch nicht in Fig. 4-21 bezogen auf die ersten 3 Messtage.

Auf einen satellitenspezifischen Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Phasenrauschens wird verzichtet, weil bei fast allen GPS-Satelliten nahezu identische Verläufe beobachtet werden konnten. Ausnahme sind PRN 19 und 23, bei denen die Ergebnisse vom 01.02.2007 von den anderen Tagen abweichen. Beim PRN 19, der an diesem Tag zeitweise „unhealthy“ gesetzt war, ist ein Spike in der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bei einer Standardabweichung um 0 erkennbar, der sich aus den zeitweise konstanten Phasenwerten ergibt (siehe Fig. 4-15). Beim PRN 23 ist am gleichen Tag ein etwas erhöhtes Maximum erkennbar. Hier wird eine Detailbetrachtung der Signalqualität empfohlen.

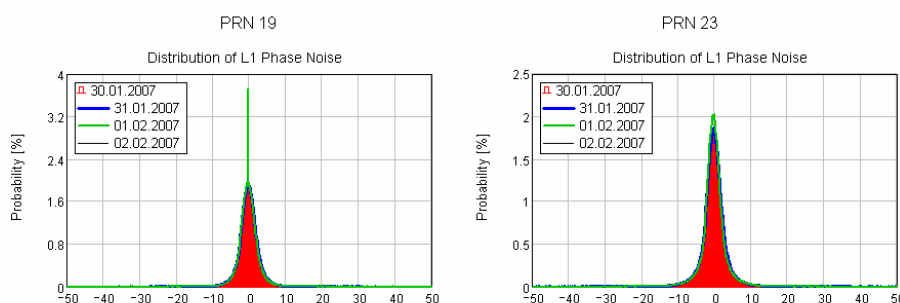


Fig. 4-23 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens an der Referenzstation für PRN 19 und 23

SF 5

- Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1-Phasenrauschens an der Referenzstation entspricht den bei anderen EVnet-Monitoringstationen ermittelten Kurven.
- Lediglich am 01.02.2007 ist eine diskrete Erhöhung bei 0 zu beobachten, die nachweislich aus dem geschätzten Phasenrauschen für PRN 19 resultiert. Obwohl der Satellit „unhealthy“ gesetzt war, wurden Phasenmesswerte bereitgestellt, die jedoch länger anhaltend nicht aufdatiert wurden. Diese Fehlmessungen implizierten, dass ein Phasenrauschen von 0 gehäuft geschätzt wurde.
- In den satellitenspezifischen Standardabweichungen des Phasenrauschens pro Tag sind die Unterschiede so gering, dass kein Rückschluss auf stärker gestörte Satellitenlinks vorgenommen werden kann.
- Der Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen pro Tag und Satellit zeigte, dass beim PRN 23 am 01.02.2007 ein leicht erhöhtes Maximum zu beobachten war. Obwohl es nicht signifikant ist, kann erst eine Detailanalyse der Signalqualitätsparameter diese Beobachtung erklären.

Bei den ROVER(n) wird sich auf eine tageweise Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen beschränkt, da eine Annahme von sich wiederholenden Empfangsbe-

dingungen an Folgetagen nicht berechtigt ist. In Fig. 4-24 ist die Datenbasis (Anzahl der Werte) zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dargestellt.

Am 30.01.2007 ist die Datenbasis deutlich reduziert, da sich dort der Messzeitraum auf nur 3,5 h beschränkt. Die Datenbasis der Empfänger GDLR, GGEG und GNSS liegen in der gleichen Größenordnung, die des GRTK-Empfängers ist nur halb so groß. Ursache dafür ist die beim GRTK bewusst verwendete Updaterate von 10 Hz.

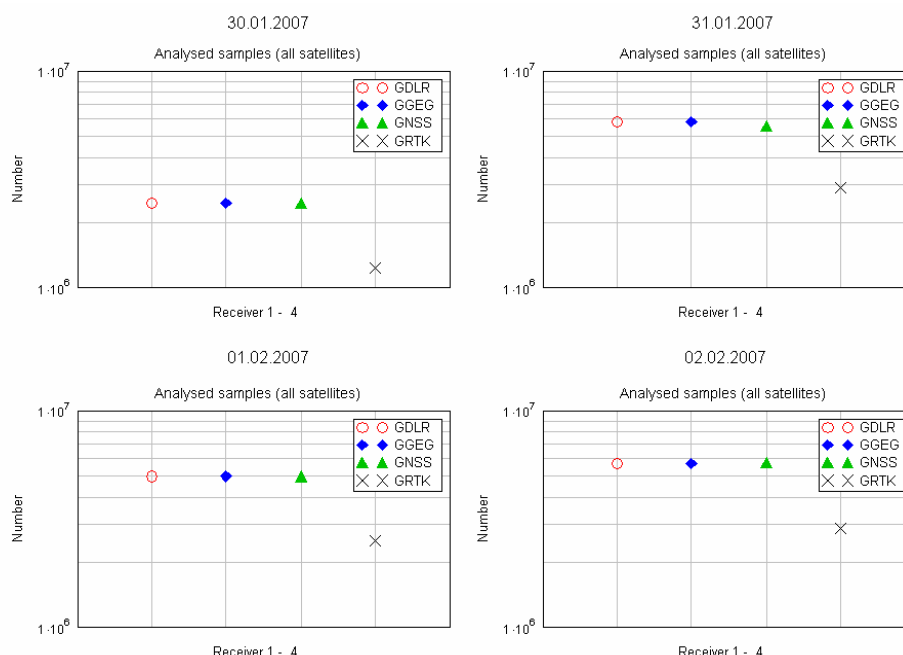


Fig. 4-24 Datenbasis der ROVER-Empfänger zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens.

Die empfängerbezogenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Phasenrauschens sind in Fig. 4-25 bis Fig. 4-28 pro Messtag dargestellt. Gegenüber der Referenzstation (siehe Fig. 4-20) besitzen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen aller ROVER einen deutlich flacheren Kurvenverlauf. Darüber hinaus ist bei den ROVER(n) wie auch bereits an der Referenzstation am 01.02.2007 ein lokales Maximum (Spike) bei 0 zu beobachten, dass auch hier durch den PRN 19 hervorgerufen wird.

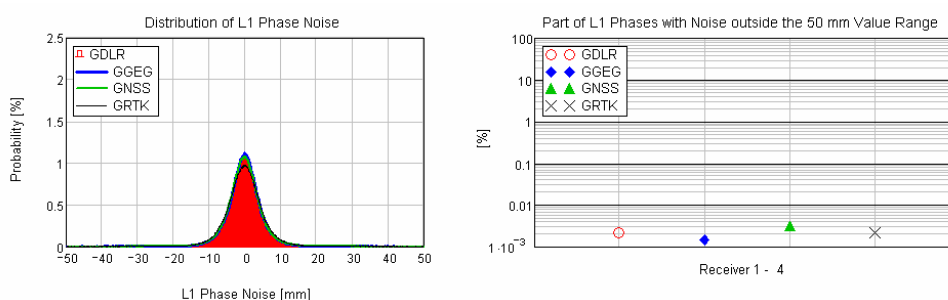


Fig. 4-25 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (30.01.2007)

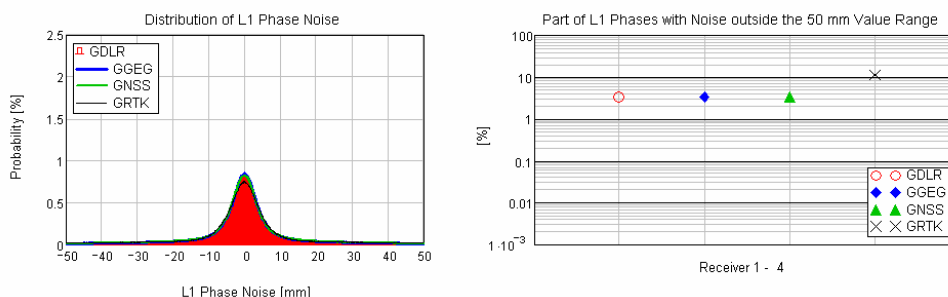


Fig. 4-26 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (31.01.2007)

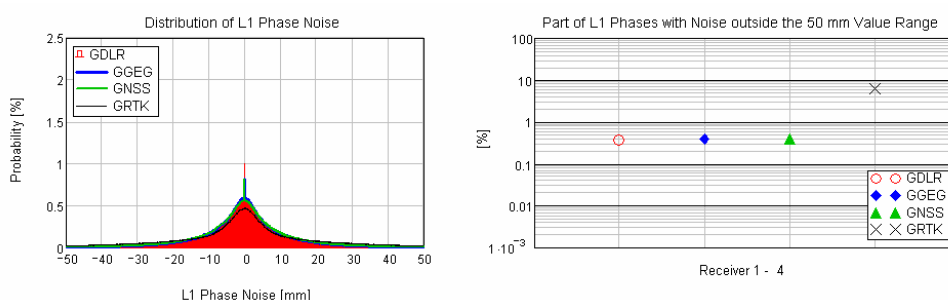


Fig. 4-27 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (01.02.2007)

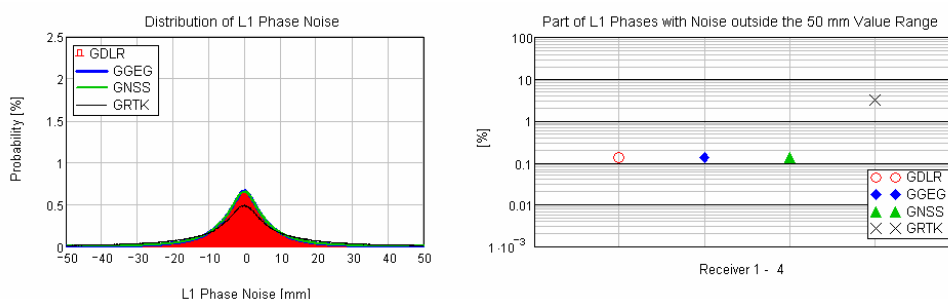


Fig. 4-28 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1 Phasenrauschens der ROVER-Empfänger sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Wertebereiches (02.02.2007)

An jedem Messtag besitzen die ROVER-Empfänger GDLR, GEGG und GNSS in Relation zueinander ein nahezu identisches Verhalten. Dies wird auch durch die Standardabweichung des Phasenrauschens der GPS L1-Phase, die pro Tag und Station ermittelt wurde, bestätigt (siehe Fig. 4-29). Lediglich beim GRTK ist eine weitere Abflachung des Kurvenverlaufs zu beobachten. Dies äußert sich auch in einer merklich erhöhten Standardabweichung.

In den Ergebnissen (Fig. 4-29) ist darüber hinaus eine Tagesabhängigkeit zu beobachten. Die Messungen vom 30.01.2007 wurden im Überseehafen und auf der Warnow gewonnen. Bei allen anderen Tagen waren Fahrtanteile auf der Ostsee dabei, wobei der 30. und 31.01.2007 die Tage mit der höchsten Windstärke und damit dem höchsten Wellengang waren. Wenn ein ursächlicher Zusammenhang dazu bestehen sollte, so müsste das Phasenrauschen zu Zeiten von Ostseepassagen deutlich erhöht werden. Eine Überprüfung erfolgt in Abschnitt 4.2.2.

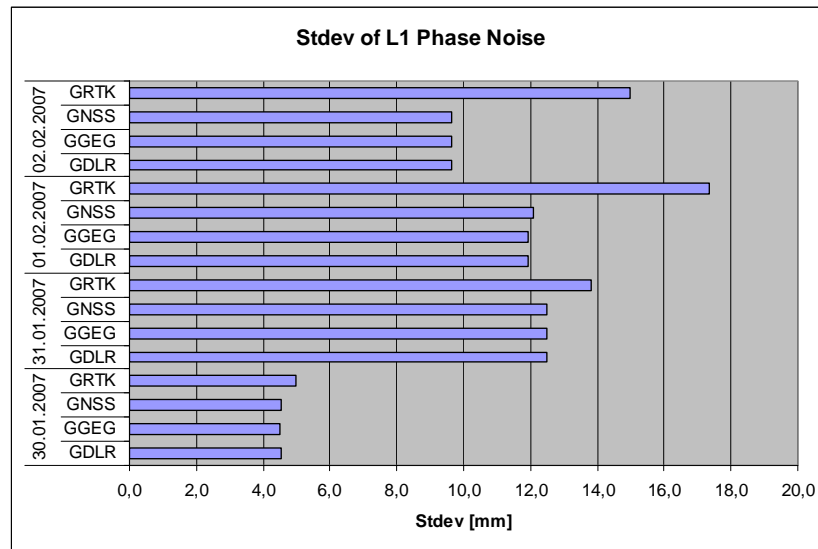


Fig. 4-29 Stationsbezogene Standardabweichung des L1- Phasenrauschens pro ROVER-Empfänger und Tag

Ein weiterer interessanter Aspekt betrifft die Anzahl von Phasenmessungen, bei denen Rauschwerte außerhalb des 50 mm Wertebereiches lagen. Bei der Anzahl dieser Ausreißer ist eine deutliche Tagesabhängigkeit zu erkennen. Am 30.01.2007 lag der Anteil unter 0.003 % und entspricht damit den Werten der Referenzstation. An den Folgetagen ist eine deutliche Erhöhung zu beobachten, wobei die Maximalwerte dem 31.01. zugeordnet sind. An diesen Tagen gilt weiterhin, dass die tagesbezogene Anzahl von Ausreißern beim GRTL deutlich über denen der anderen ROVER-Empfänger liegt. Um die Ursachen zu ergründen, ist im ersten Schritt zu klären, ob die beobachteten Trends sich auch satellitenbezogen widerspiegeln. Dazu werden die Standardabweichungen des L1-Phasenrauschens und der prozentuale Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50 mm Bereiches pro Satellit, ROVER und Tag in Fig. 4-30 bis Fig. 4-33 gegenübergestellt.

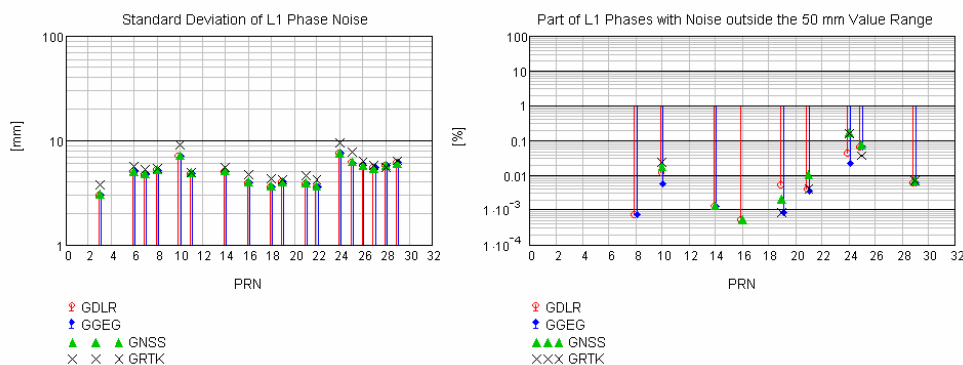


Fig. 4-30 Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (30.01.2007)

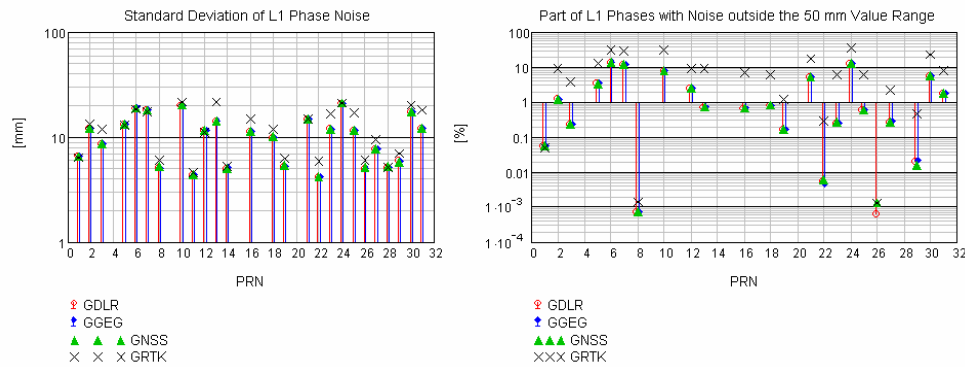


Fig. 4-31 Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (31.01.2007)

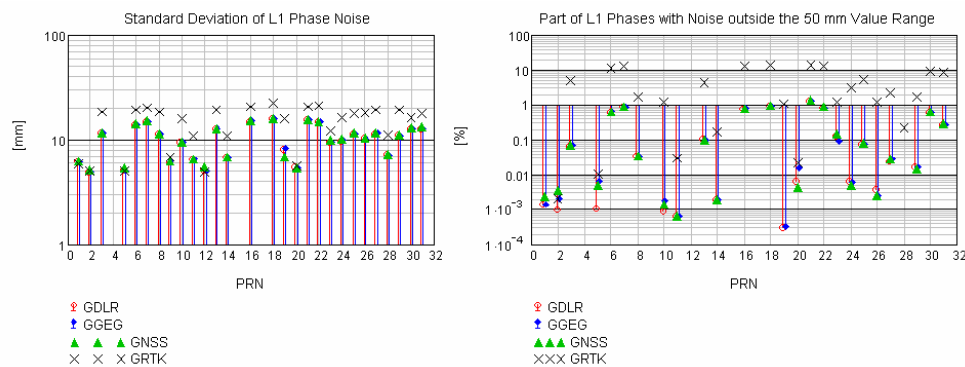


Fig. 4-32 Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (01.02.2007)

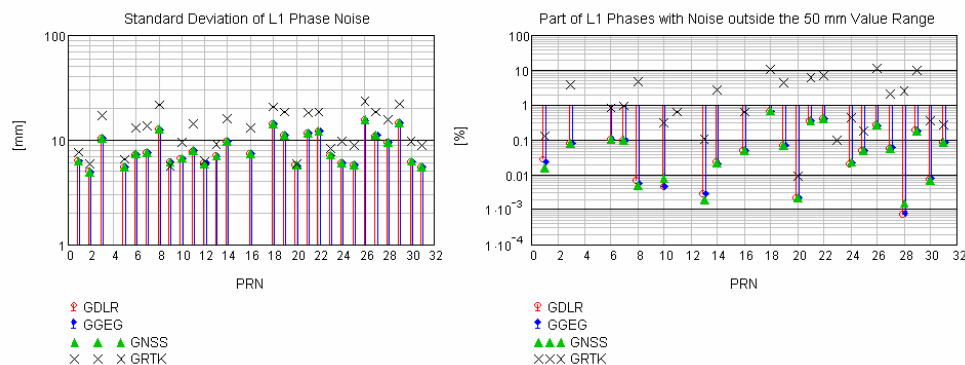


Fig. 4-33 Standardabweichung des Phasenrauschens pro GPS-Satellit sowie zugeordnet der Anteil von Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches (02.02.2007)

Bei den satellitenspezifischen Standardabweichungen des L1-Phasenrauschens gilt, dass die Werte vom GRTK gleichwertig oder über denen der anderen ROVER-Empfänger liegen. Eine eindeutige PRN-Abhängigkeit ist nicht erkennbar. Im Zeitraum 31.01. bis 02.02. gilt diese Aussage auch für die Anzahl von geschätzten Phasenrauschwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches. Damit ist belegt, dass die Abflachung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beim GRTK-Empfänger nicht durch einzelne Satelliten hervorgerufen wird.

Ob das erhöhte Phasenrauschen beim GRTK durch die geringere Updaterate bedingt ist, ist eine zu klärende Fragestellung:

Die Schätzung des Phasenrauschens wird durch den CSD vorgenommen. Dazu wird die Dynamik der Phasenrate über 5 s mittels Polynomapproximation modelliert. Für die Modellbildung werden beim GRTK folglich 50 Messwerte und bei den anderen ROVER-Empfängern 100 Messwerte genutzt. Dieses Polynom wird genutzt, um die nächste Phasenrate durch Extrapolation zu schätzen. Aus dem eingehenden Phasenwert wird die „gemessene“ Phasenrate bestimmt. Ihre Differenz zur Geschätzten stellt dabei den Schätzwert für das doppelte Phasenrauschen multipliziert mit der Samplingfrequenz dar. Hierbei ist zu bemerken, dass der Schätzwert für das doppelte Phasenrauschen effektiv die Summe des doppelten Phasenrauschens und des Modellierungsfehlers ist. Erfolgt die Ausgabe des Schätzwertes normiert auf die Samplingfrequenz (wie beim CSD), so wird zwar Vergleichbarkeit der Rauschanteile bei Nutzung verschiedener Samplingfrequenzen gewährleistet, jedoch der Modellierungsfehler bei Verwendung geringerer Samplingfrequenzen verstärkt. Da der GRTK eine Updaterate von 10 Hz hatte und die anderen mit 20 Hz betrieben wurden, ist mit einer Verdoppelung des Modellierungsfehlers zu rechnen. Oder anders formuliert, wenn die Standardabweichung des Phasenrauschens beim GRTK doppelt so groß wäre wie bei den anderen ROVER(n), würde das geschätzte Phasenrauschen dominant durch den Modellierungsfehler bestimmt sein.

Als Referenzstandardabweichung wird das gewichtete Mittel der Standardabweichung des Phasenrauschens pro Satellit und 20Hz-ROVER-Empfänger wie folgt bestimmt

$$\overline{stdev}_{nsat} = \frac{stdev_{nsat,GGEG} \cdot N_{nsat,GGEG} + stdev_{nsat,GDLR} \cdot N_{nsat,GDLR} + stdev_{nsat,GNSS} \cdot N_{nsat,GNSS}}{N_{nsat,GGEG} + N_{nsat,GDLR} + N_{nsat,GNSS}},$$

wobei $stdev$ das empfängerspezifische Ergebnis pro Satellit und N die zugeordnete Messwertanzahl ist. Dieser Ansatz ist berechtigt, wenn man die bereits in Fig. 4-30 bis Fig. 4-33 nachgewiesene Übereinstimmung der satellitenspezifischen Standardabweichungen des Phasenrauschens berücksichtigt. Der Quotient aus der Standardabweichung beim GRTK und der Referenzstandardabweichung wird dann als Verstärkungsfaktor

$$fac_{nsat} = \frac{stdev_{nsat,GRTK}}{stdev_{nsat}}$$

interpretiert. Diese sind pro Tag in Fig. 4-34 dargestellt.

Bei ruhigen Messbedingungen wie am 30.01.2007 liegt die Abweichung der Standardabweichungen des GRTK unter 30 %. An anderen Tagen kann sie durchaus bis zu 80 % betragen, ist jedoch nicht allgemeingültig. Ein Extremfall wird am 01.02.2007 beim PRN 19 beobachtet, bei dem eine doppelt so große Standardabweichung des Phasenrauschens für die GRTK-Daten ausgewiesen wird. Es muss aber festgestellt werden, dass es an jedem Tag satellitenspezifische Ergebnisse gibt, bei dem das GRTK nicht mehr als 10% von dem der anderen ROVER-Empfänger abweicht. Dies wie auch die vergleichsweise relativ geringen Standardabweichungen des Phasenrauschens bei der Referenzstation sind Indikatoren dafür, dass die Modellierungsfehler der Phasendynamik bei einigen Satelliten einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil liefern. Das würde implizieren, dass eine hohe Identität der Standardabweichung auf Trackingzeiten abgebildet werden kann, bei denen die Empfänger geringeren Dynamikvariationen unterlagen. Eine Überprüfung erfolgt in Abschnitt 4.2.2 .

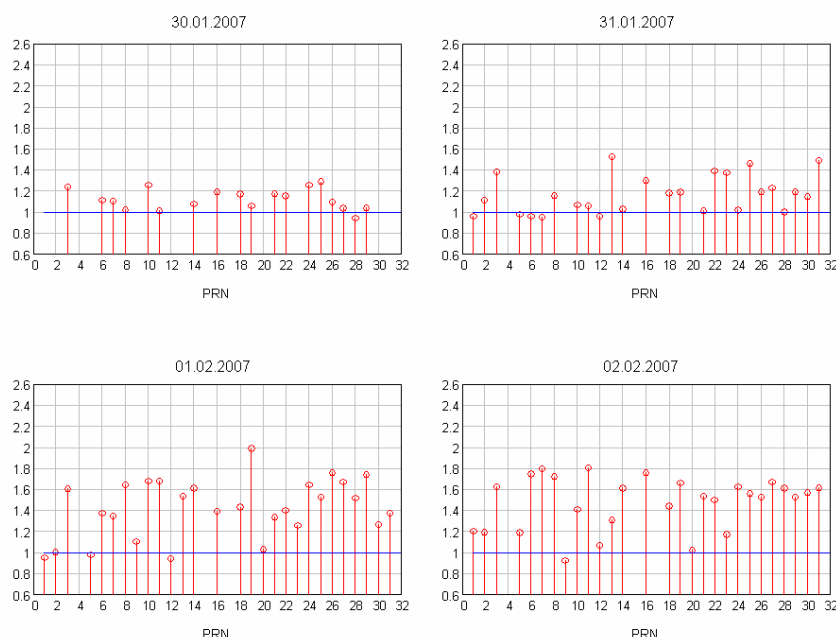


Fig. 4-34 Quotient aus Standardabweichung des Phasenrauschs beim GRTK und der Referenzstandardabweichung pro Satellit und Tag

In den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen pro Station wurde am 01.02.2007 ein diskretes Maximum bei der Referenzstation und den ROVER-Empfängern GDLR, GNSS und GGEG beobachtet.

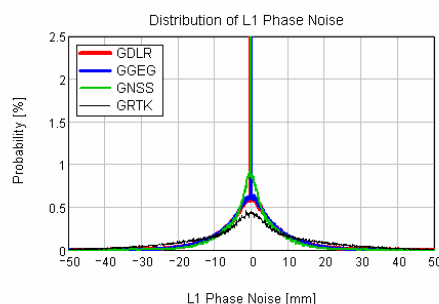


Fig. 4-35 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1-Phasenrauschs vom PRN 19 am 01.02.2007

Bei Betrachtung der satellitenspezifischen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für PRN 19 (Fig. 4-35) wird deutlich, dass bei diesem Satelliten, der an diesem Tag „unhealthy“ gesetzt war, diskrete Maxima bei einem L1 Phasenrauschen von 0 auftreten. Ursache dafür sind Phasenwerte, die länger anhaltend nicht aufdatiert wurden und damit zu geschätzten Phasenrauschwerten von 0 führten.

Dieser Effekt ist jedoch nicht in der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des GRTK-Empfängers sichtbar. Wenn man das CSD-Trackingprotokoll des GRTK mit denen der anderen Empfänger vergleicht (siehe Fig. 4-14), so ist erkennbar, dass bei ihm eine Phasenbewertung erst ca. 20 Minuten später erfolgt. Wenn nachweisbar ist, dass die konstanten Phasenmesswerte der anderen Empfänger (GDLR, GNSS, GGEG) vorher auftraten, so wäre es erklärbar, dass in der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des GRTK das diskrete Maximum bei einem Phasenrauschen von 0 fehlt. Aber auch die Kurvenverläufe von GDLR, GNSS und GGEG unterscheiden sich voneinander. Während GGEG und GDLR einen nahezu identischen Verlauf haben, verläuft die Kurve des GRTK deutlicher flacher und besitzt die Wahr-

scheinlichkeitsdichtefunktion des GNSS ein ausgeprägteres Maximum um ein Phasenrauschen von 0.

Diese Effekte sind ein Indiz dafür, dass die Empfänger beim Tracken des auf „unhealthy“ gesetzten Satelliten PRN 19 sich unterschiedlich verhalten.

SF 6

- Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des L1-Phasenrauschens an den ROVER(n) hat generell einen flacheren Verlauf gegenüber dem Verhalten der GBAS-Station. Das ist ein Indiz für die Zunahme methodikbedingter Modellierungsfehler der Phasendynamik.
- Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Phasenrauschens (pro Satellit oder auch pro ROVER) weisen bei den 3 ROVER-Empfängern GDLR, GGEG und GNSS ein nahezu identisches Verhalten auf. Dies wird auch durch die nahezu identischen Standardabweichungen des Phasenrauschens sowie durch die vergleichbare Anzahl von Phasenwerten außerhalb des 50mm-Wertebereiches bestätigt.
- Obwohl beim GRTK-Empfänger flachere Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen und größere Standardabweichungen des geschätzten Phasenrauschens im Vergleich zu den anderen ROVER-Empfängern beobachtet werden, kann daraus nicht abgeleitet werden, dass der GRTK-Empfänger ein höheres Phasenrauschen besitzt. Der endgültige Nachweis, dass Erhöhungen methodikbedingt in Folge von Messzeitpunkten mit erhöhter Phasendynamik sind, kann nur endgültig mit den Untersuchungen in Abschnitt 4.2.2 erbracht werden.
- Die Unterschiede in den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Phasenrauschens vom PRN 19 am 01.02.2007 (diskrete Maxima, abweichende Kurvenverläufe) erfordern eine Analyse der Detailergebnisse.
- Beim PRN 23 sind an der Referenzstation relativ geringe Unterschiede im Verlauf der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Phasenrauschens zu beobachten. Da die Unterschiede sich im Wert der Standardabweichung des Phasenrauschens nicht signifikant von Unterschieden an anderen GPS-Satelliten unterscheiden, wird eine weitere Untersuchung nicht verfolgt.

4.2.2 Standardabweichung des Phasenrauschens pro Minute im Zeitbezug¹⁰

Normalerweise würde man erwarten, dass das Phasenrauschen während eines Satellitendurchgangs bei niedrigen Elevationswinkeln am größten ist. Treten jedoch ausbreitungsbedingt oder durch Variationen in der Nutzerdynamik Phasenschwankungen auf, die nicht oder unzureichend durch das Polynom modellierbar sind, so können diese auch zu einer Erhöhung des geschätzten Phasenrauschens bei hohen Elevationswinkeln führen. Diese wären dann situationsbedingt und damit zeitabhängig. Um vorab einen Gesamtüberblick zu be-

¹⁰ Die in diesem Kapitel erzeugten Grafiken wurden auf der Grundlage der vom CSD generierten Dateien vom Typ sigPHN_PRN_F.dat mit Hilfe von sigPHN_VIEW..xmcd erzeugt.

kommen, werden die pro Minute bestimmten Standardabweichungen des Phasenrauschens in ihrer Zeitabhängigkeit pro Empfänger und Tag dargestellt.

Bei der Referenzstation ist erkennbar (Fig. 4-36), dass die Standardabweichung des L1 Phasenrauschens in der Regel deutlich unter 1 cm liegt. Maximalwerte von bis zu 3 cm lassen sich niedrigen Elevationswinkeln zuordnen. Um dies zu verdeutlichen, wurden die Werte von 2 Satelliten (PRN 11 und 19) farblich hervorgehoben. Ein vergleichbares Verhalten ist auch bei den GLONASS-Phasenmessungen im oberen L-Band zu beobachten, so dass auf ihre Darstellung verzichtet wird.

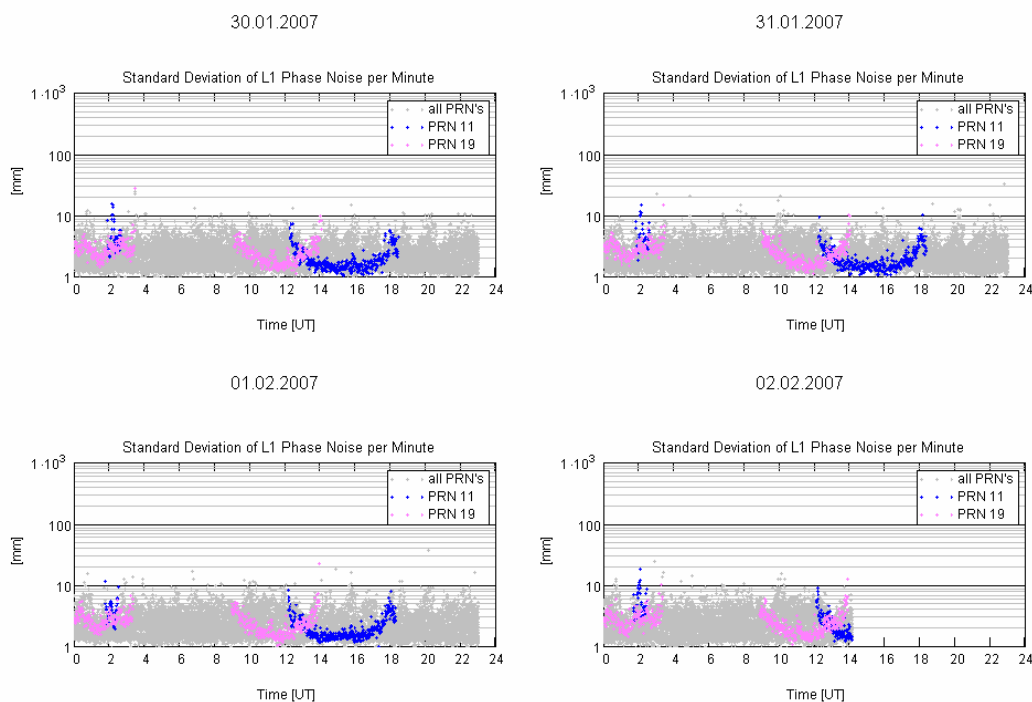


Fig. 4-36 Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an der Referenzstation

Bei den ROVER-Empfängern werden die Ergebnisse tageweise dargestellt. Fahrten auf der Ostsee sind farblich unterlegt.

Am 30.01.2007 (Fig. 4-37) liegt der Beginn der gemeinsamen, hochratigen Datenaufzeichnung um 10:00 Uhr und entspricht der Einfahrt des Schiffes in die Warnow. Folglich liegen keine Messwerte vor, die auf der Ostsee gewonnen wurden. An den ausgewählten Satelliten wird deutlich, dass das Verhalten des Phasenrauschens an allen 4 Empfängern in der gleichen Größenordnung liegt und der gleichen zeitlichen Variation folgt. Die Standardabweichung des Phasenrauschens liegt bei den ROVER(n) vorwiegend unter 1 cm, ist aber im Vergleich zu den Referenzstationswerten, die deutlich unter 1 cm lagen, leicht erhöht.

Am 31.01.2007 (Fig. 4-38) steigt die Standardabweichung des L1 Phasenrauschens pro Minute dramatisch bis auf 10 cm, wenn das Forschungsschiff auf der Ostsee bei Windstärke 8 kreuzt. Innerhalb der Binnengewässer (Überseehafen, Warnow) liegt die Standardabweichung wiederum vorwiegend unter 1 cm.

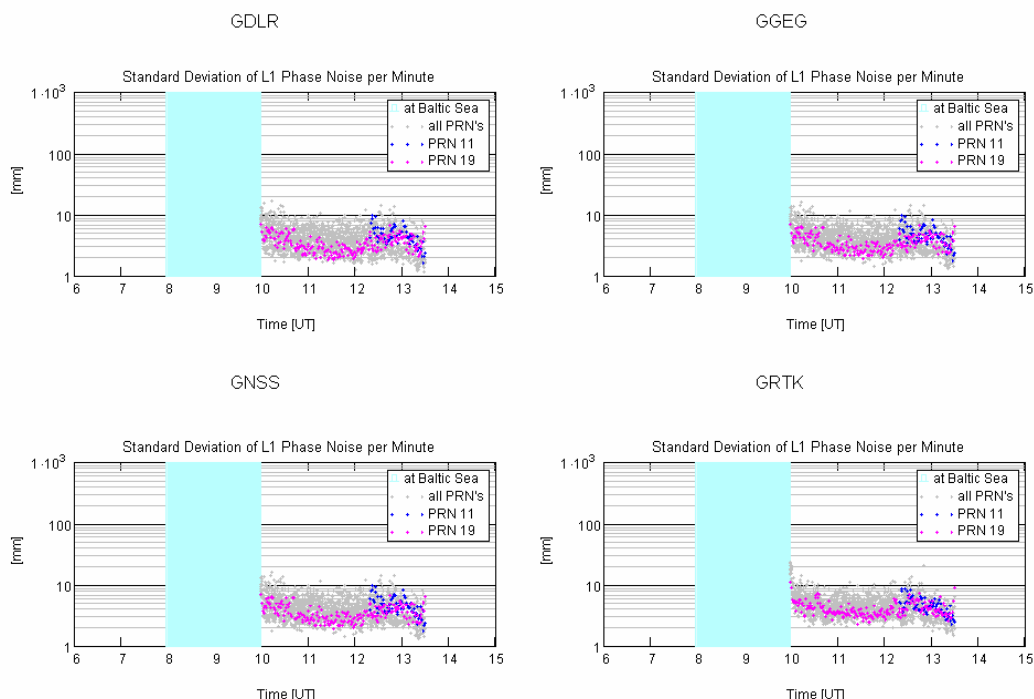


Fig. 4-37 Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens an den ROVER(n) am 30.01.2007

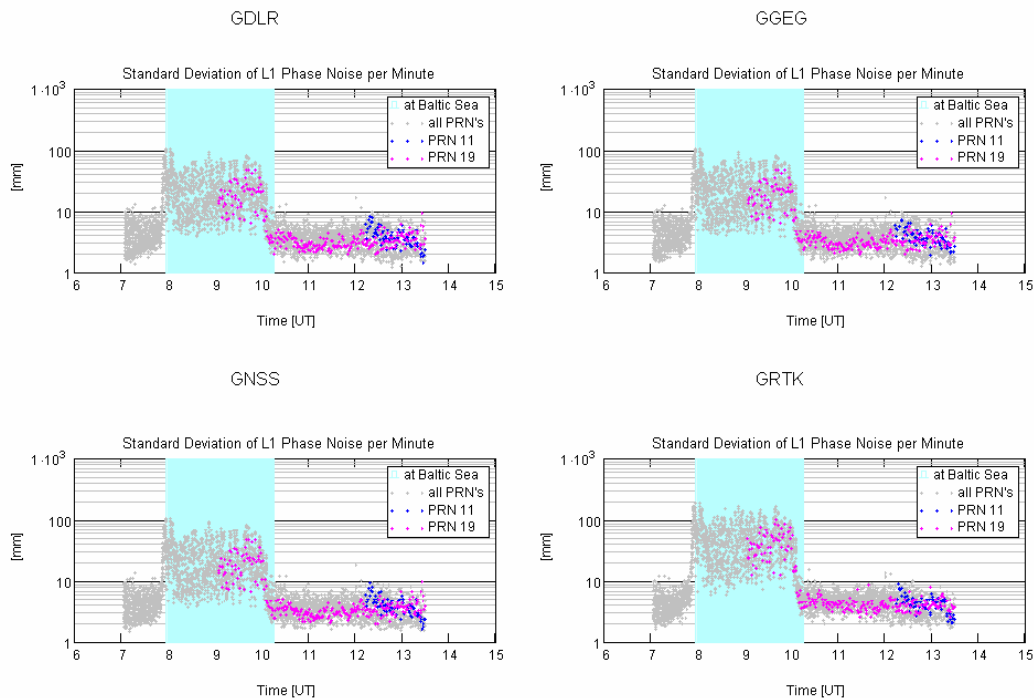


Fig. 4-38 Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an den ROVER(n) am 31.01.2007

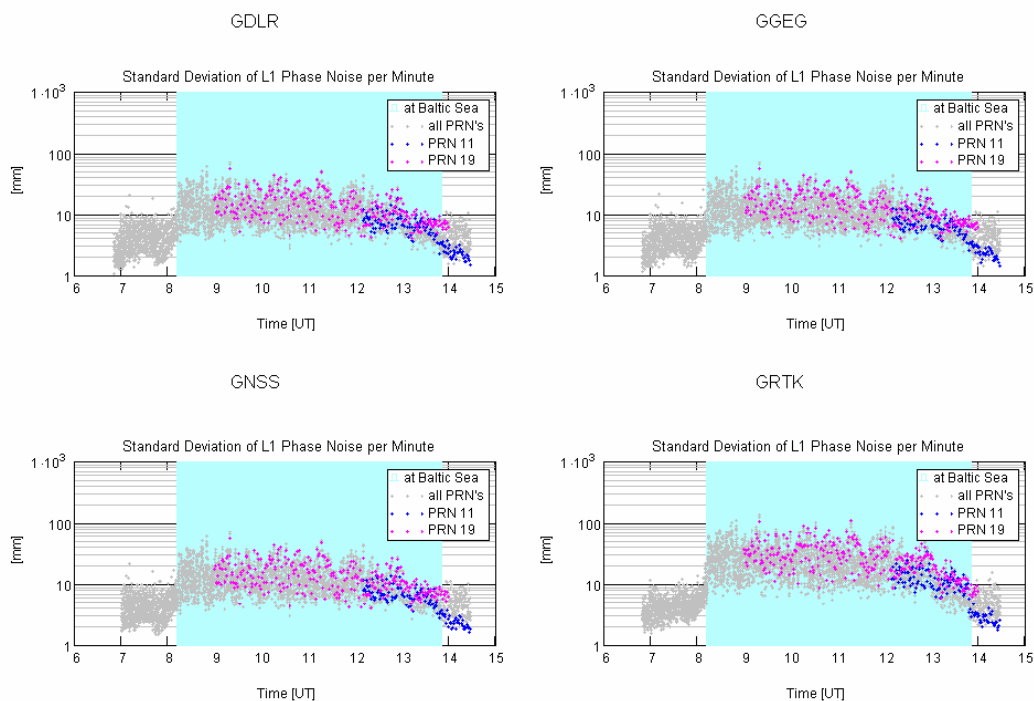


Fig. 4-39 Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an den ROVER(n) am 01.02.2007

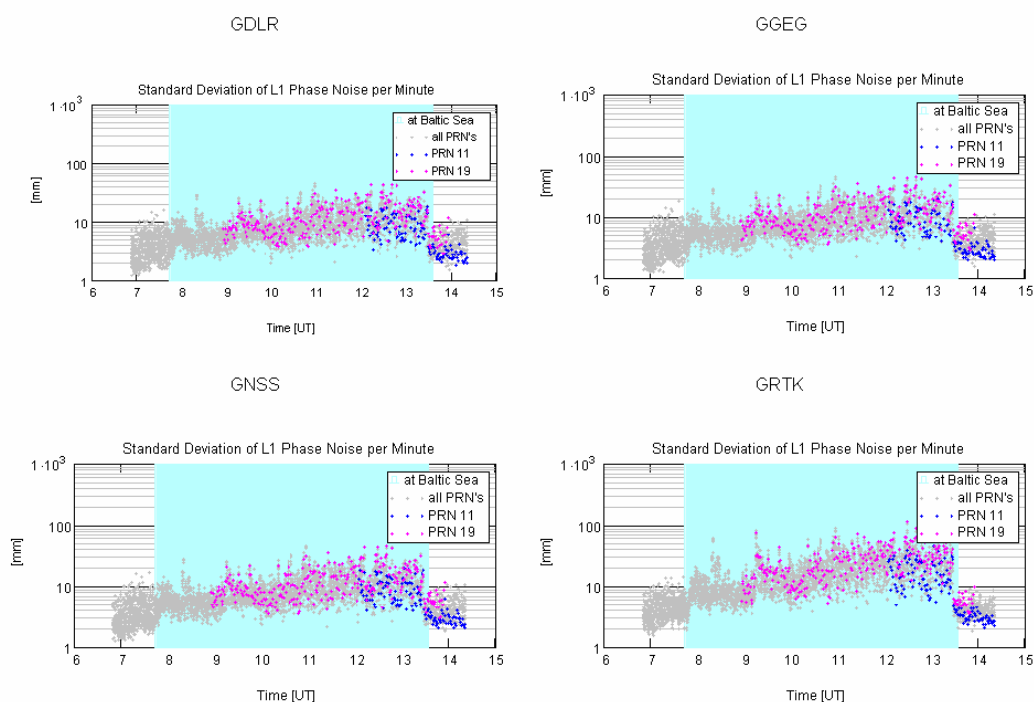


Fig. 4-40 Standardabweichung des GPS L1 Phasenrauschens pro Minute an den ROVER(n) am 02.02.2007

Auch an den Folgetagen (siehe Fig. 4-39 und Fig. 4-40) ist der zeitliche Zusammenhang zwischen Fahrten auf der Ostsee und erhöhten Phasenrauschen deutlich erkennbar.

Normalerweise würde man erwarten, dass so hohe Standardabweichungen zur Detektion von Cycle Slips führen. Hier sollte erwähnt werden, dass der CSD für die Cycle Slip Erkennung die momentane Phasenvariation mit beachtet. Die Fehldetektion von Cycle Slips wird reduziert, in dem die erlaubte Abweichung zwischen gemessener und extrapolierte Phasenrate proportional mit dem vorab geschätzten Phasenrauschen steigt. Da die Witterungsbedingungen (Seegang, Wind) und die Fahrtrouten an den 3 Tagen mit Ostseepassagen sich unterschieden, spiegeln sich in den zu diesen Zeiträumen beobachteten Variationen die Dynamikvariation des Antennenstandortes auf dem Schiff wieder. So erscheint der 02.02.2007 als ruhigerer Tag, weil dort die Standardabweichungen des Phasenrauschens vorwiegend unter 3 cm lagen. Der 31.01.2007 besitzt die höchste Dynamik des Antennenstandortes, da hier Standardabweichungen bis zu 30 cm zu beobachten waren.

Der Vergleich der GRTK-Ergebnisse mit denen der anderen ROVER-Empfänger verdeutlicht, dass bei den Ostseepassagen seine Standardabweichungen des L1 Phasenrauschens erkennbar über der der anderen lagen. Diese Tatsache ist ein erster Beweis dafür, dass sich beim GRTK der Modellierungsfehler durch die geringere Abtastfrequenz stärker abbildet, jedoch das eigentliche Phasenrauschen mit den anderen ROVER(n) durchaus vergleichbar sein kann. Dieses Verhalten ist auch in den Standardabweichungen des Phasenrauschens der GLONASS-Signale im oberen L-Band erkennbar.

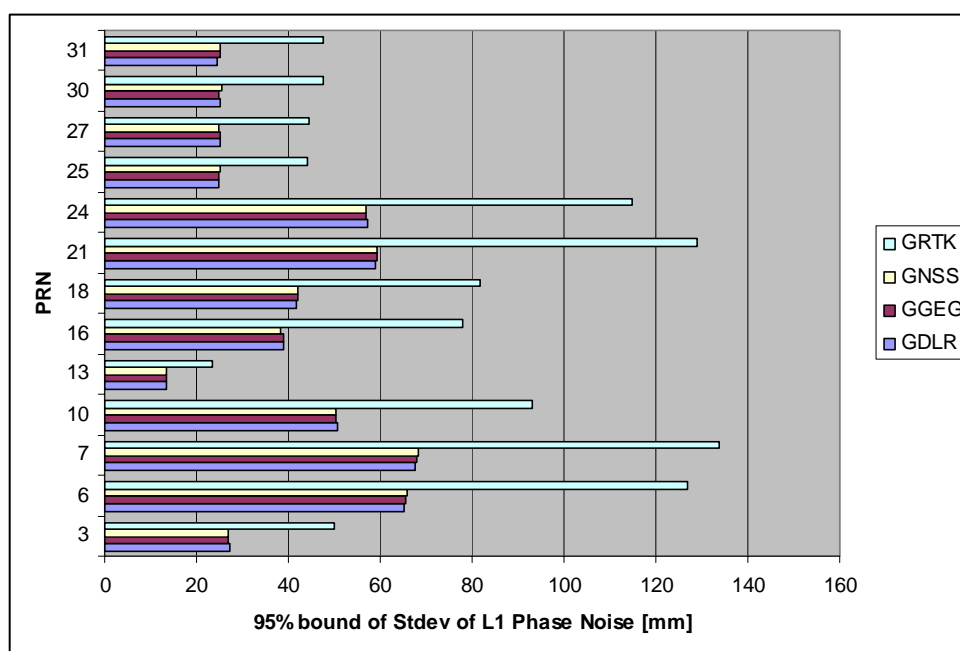


Fig. 4-41 Perzentil P95 der pro Minute bestimmten Standardabweichung des L1 Phasenrauschens für den Zeitraum 9:00 – 10:00 UT (Ostseepassage, 31.01.2007)

Auf eine Darstellung wird jedoch verzichtet. Um dies noch endgültig zu beweisen, werden 2 Messzeiträume am 31.01.2007 von je einer Stunde ausgewählt (Ostseepassage, Fahrt im Überseehafen). Es wurden alle in diesem Zeitraum ermittelten Standardabweichungen des Phasenrauschens eines Satelliten genutzt, um das Perzentil P95¹¹ zu bestimmen.

¹¹ Durch Perzentile (lat. „Hundertstelwerte“), auch Prozenträge genannt, wird die Verteilung in 100 gleich große Teile zerlegt. Das Perzentil P95 beschreibt dabei den Grenzwert, unterhalb dem 95 % aller ermittelten Standardabweichungen liegen.

In Fig. 4-41 sind die P95-Werte auf der Grundlage der zwischen 9:00 und 10:00 UT bestimmten Standardabweichungen der L1 Phase dargestellt.

Dieser Zeitraum ist der Ostseepassage bei Windstärke 8 zugeordnet. Hier liegen die Ergebnisse des GRTK bei jedem Satelliten deutlich über denen der anderen ROVER-Empfänger. Es kann nicht erwartet werden, dass sich die durch die Schwankungen des Antennenstandortes hervorgerufene Phasenvariation sich in den Signalen der getrackten Satelliten in gleicher Weise abbildet. Das begründet sich in der Relation der Richtungsabhängigkeiten des einfallenden Signals und der Änderung des Standortes. So liegt z.B. P95 beim PRN 13 noch im Bereich weniger cm, erreicht aber beim PRN 7 Werte von über 6 cm, die bei Nutzung einer geringeren Abtastfrequenz (10 Hz) Werte erreicht (bei PRN 6, 7 und 21 sind dies für GRTK z.B. bereits als 12 cm, d.h. mehr als $\lambda/2$ für L1), die eine Fehldetektion von Cycle Slips zur Folge haben kann.

Im Gegensatz dazu fallen die für den Zeitraum zwischen 11:00 und 12:00 Uhr ermittelten Grenzwerte deutlich geringer aus (siehe Fig. 4-42). Die P95-Werte liegen generell unter 1 cm.

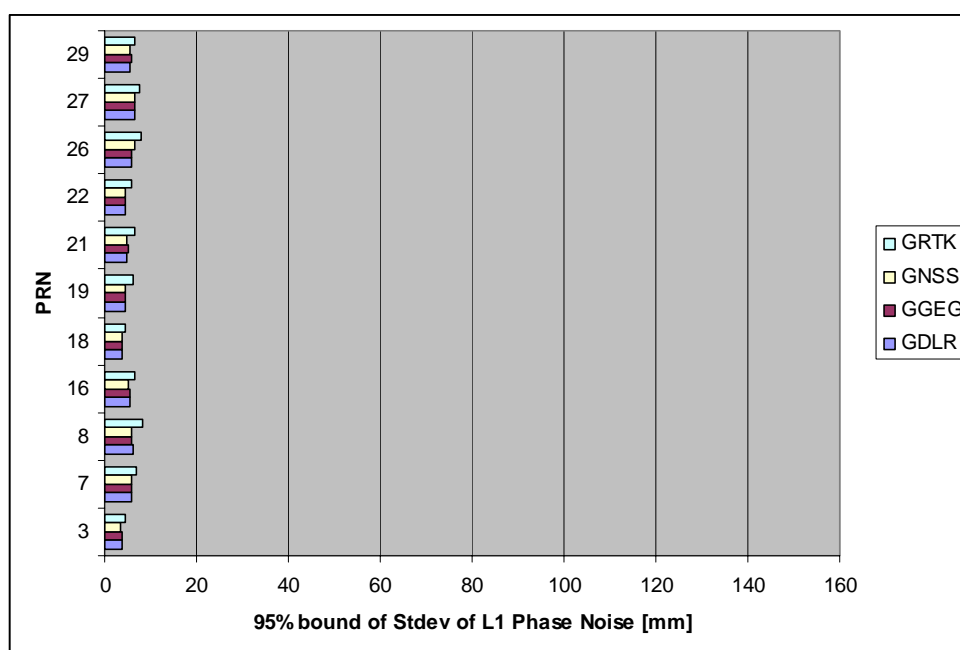


Fig. 4-42 Perzentil P95 der pro Minute bestimmten Standardabweichung des L1 Phasenrauschens für den Zeitraum 11:00 – 12:00 UT (Überseehafen, 31.01.2007)

Das zeigt, dass in den Schätzwerten des Phasenrauschens der Modellierungsfehler zu beachten ist, der durch die aktuellen Messbedingungen (Schiffsgeschwindigkeit, Einfluss von Wellengang, Schiffsvibrationen) mit beeinflusst wird. In ruhigen Gewässern ist die geringere Differenz zwischen den 10Hz- und 20Hz-Ergebnissen ein Zeichen für den reduzierten Einfluss des Modellierungsfehlers auf die Schätzung des Phasenrauschens.

Das impliziert den Verdacht, dass eine gehäufte Detektion von Cycle Slips in Zeiträumen von Ostseepassagen aus dem angestiegenen Modellierungsfehler resultiert und es sich damit um Fehldetektionen handelt. Ein solcher Sonderfall war das gehäufte Auftreten von Cycle Slips am 31.01.2007 zwischen 8:00 und 10:00 Uhr (siehe SF 3 und SF 4), das nur beim GRTK-Empfänger beobachtet werden konnte. Der Messzeitraum fällt mit der Ostseepassage bei Windstärke 8 zusammen. Betroffen waren die GPS Satelliten 6, 7, 21 und 24 sowie die GLONASS Satelliten mit der ID 36, 39, 50 und 52. Es könnte sich folglich beim GRTK um fehlerhaft detektierte Cycle Slips in Folge der Zunahme des Modellierungsfehlers handeln.

Die Abweichung des Erwartungswertes der Phasenrate vom Messwert (Phasenrate abgeleitet aus zwei aufeinander folgenden Phasenmesswerten) wird im CSD als Prädiktionsfehler *predError* bestimmt. Wenn mit einem festen Entscheidungspegel gearbeitet wird, so würde eine Differenz größer 1 cycle die Detektion eines Cycle Slips zur Folge haben. Beim CSD ist neben dieser Bedingung für die Detektion eines Cycle Slips noch erforderlich, dass auch die Wertebereichsbedingung verletzt wird. Hier muss der Messwert zusätzlich außerhalb des Wertebereiches liegen, der durch den prognostizierten Wert der Phasenrate plus bzw. minus der 4-fachen Standardabweichung des geschätzten Modellierungsfehlers liegt.

In Fig. 4-43 sind die zugeordneten Prädiktionsfehler als Funktion der Zeit und in ihrer Zuordnung zur PRN-Nummer des Satelliten dargestellt. Bei einer Vielzahl detektierte Cycle Slips liegt der Prädiktionsfehler knapp über +1 oder unter -1. Dies alleine ist ein Indiz dafür, dass es sich bei diesen detektierten Cycle Slips um ein Grenzwertproblem handelt, dass nicht zwangsläufig durch die Wertebereichsbedingung aus der Historie abgefangen werden kann. Streng genommen ist es nicht möglich, bei diesen zwischen kleinskaligen Cycle Slips (+1 cycle) und fehlerhaft detektierten zu unterscheiden. Lediglich aus der Tatsache, dass bei den anderen ROVER(n) keine detektiert wurden (Modellierungsfehlerproblem ist auf die Hälfte reduziert und fällt damit bereits unter dem fixen Entscheidungspegel), ist ein Indiz dafür, dass es sich um eine Fehldetektion handelt. Eine endgültige Bestätigung erfordert eine Detailanalyse des Zeitverhaltens der Phasen und u.U. die Zuhilfenahme weiterer Bewertungskriterien.

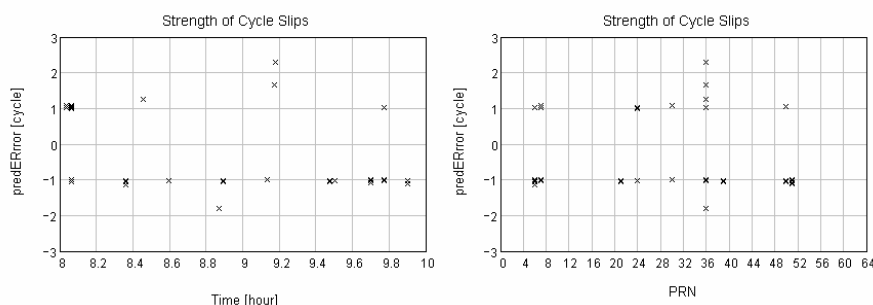


Fig. 4-43 Prädiktionsfehler bei detektierten Cycle Slips in den GRTK-Messungen am 31.01.2007

SF 7

- Es konnte nachgewiesen werden, dass in den Schätzungen des Phasenrauschens insbesondere bei dynamisch betriebenen Empfängern der Modellierungsfehler nicht vernachlässigbar ist. Dadurch haben die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des L1-Phasenrauschens an den ROVER(n) generell einen flacheren Verlauf gegenüber dem Verhalten der GBAS-Station.
- Beim GRTK, der nur mit 10 Hz betrieben wurde, verstärkt sich der Effekt methodikbedingt. Dadurch entstehen insbesondere am 31.01.2007 bei der Ostseepassage eine gehäufte Anzahl detektierter Cycle Slips, die so bei den mit einer Samplingfrequenz von 20 Hz betriebenen ROVER(n) nicht beobachtet werden. Der Verdacht liege nahe, dass es sich bei diesen Cycle Slips um fehlerhaft detektierte handelt. Ein endgültiger Nachweis kann nur mit einer Detailanalyse der Phasenmesswerte erbracht werden.

4.2.3 Zusammenhang zwischen L1- und L2-Phasenrauschen¹²

Grundlage für diese Analyse sind die pro Trägerfrequenz durch den CSD unabhängig voneinander geschätzten Momentanwerte des L1- und L2-Phasenrauschens mit einer durch die Abtastrate bestimmten Zeitauflösung. Um ihren Zusammenhang zu bestimmen, wird das in Kapitel 10 „Anlage B“ beschriebene Verfahren eingesetzt. Dieses ist Bestandteil der Analysesoftware CSD-Analysator, dessen Konfigurationsparameter in Kapitel 9.3.1 nachzulesen sind. Jedes Paar eines L1- und L2-Phasenwertes wird folglich mit einer Auflösung von 0.1 mm quantifiziert und dient dazu, ein vorab angelegtes Häufigkeitsfeld aufzudatieren. Aus diesem werden dann Mittelwert und Standardabweichung der L2-Phase in Bezug auf ein L1-Phasenquantil bestimmt, wenn für dieses mehr als 100 Messwertpaare vorlagen.

Für die Auswertung werden folgende Thesen aufgestellt:

- Wird das geschätzte Phasenrauschen nur durch das Phasenrauschen bestimmt, so wird erwartet, dass sein Mittelwert nahezu 0 ist. Dann müsste auch der Mittelwert des L2-Phasenrauschens unabhängig von seiner Zuordnung zu den L1-Phasenrauschwerten Null sein.
- Sind in der Schätzung des Phasenrauschens andere Anteile (Modellierungsfehler in Abhängigkeit von der Phasendynamik und/oder Ausbreitungsfehler) enthalten, so entstehen funktionale Abhängigkeiten.
- Resultiert der Modellierungsfehler vorwiegend aus der Änderung des geometrischen Ranges, so bildet er sich gleichermaßen in den L1- und L2-Phasenrauschschätzungen ab. Es ist dann zu erwarten, dass zwischen dem Mittelwert des L2-Phasenrauschens pro L1-Phasenrauschquantil ein linearer Zusammenhang mit dem Anstieg 1 besteht.
- Wenn festzustellen wäre, dass hohe ionosphärische Gradienten den Modellierungsfehler mitbestimmen, so sollte der Anstieg der linearen Abhängigkeit zwischen Mittelwert des L2-Phasenrauschens und dem L1-Phasenrauschenquantil von 1 abweichen.
- Wenn das L2-Phasenrauschen signal-, empfänger- oder prozessierungsbedingt über dem L1-Phasenrauschen liegt, so sollte dies sich primär in der Standardabweichung des L2-Phasenrauschens abbilden.
- Generell ist zu erwarten, dass die Standardabweichung des Phasenrauschens bei niedrigeren Elevationswinkeln steigt, weil dann die Signalqualität durch längere Ausbreitungswege und höhere Phasendynamik sinkt.

In den Fig. 4-44 bis Fig. 4-48 sind für die Referenzstation an allen 4 Messtagen und für die ROVER-Empfänger der Zusammenhang zwischen dem L2- und dem L1-Phasenrauschen dargestellt.

In allen Grafiken ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Mittelwert des L2-Phasenrauschens und dem L1-Phasenrauschquantil erkennbar. Dieser beweist, dass die geschätzten Phasenrauschwerte einen wachsenden Modellierungsfehler mit zunehmender Phasendynamik enthalten, unabhängig davon, ob es sich um statisch oder dynamisch gewonnene Messergebnisse handelt.

Bei den Standardabweichungen des L2-Phasenrauschens in Abhängigkeit vom L1-Phasenrauschen ist allgemeingültig zu beobachten, dass ihr Minimum bei L1-

¹² Die in diesem Kapitel erzeugten Grafiken wurden auf der Grundlage der `L2noise_L1noiseL1noise.dat` mit Hilfe von `L2-noise_vs_L1-noise.xmcd` erzeugt. Als Eingangsdaten werden das geschätzte Phasenrauschen pro Messzeitpunkt bezogen auf die Gesamtmesszeit und alle getrackten Satelliten genutzt.

Phasenrauschwerten um 0 liegt. Die minimale Standardabweichung des L2-Phasenrauschens wird an der Referenzstation mit 0.4 mm ermittelt. Bei den ROVER-Empfängern GGEG, GNSS und GDLR liegt das Minimum der L2-Standardabweichung etwas höher bei 0.45 mm.

Beim GRTK liegt die Standardabweichung des L2-Phasenrauschens im Durchschnitt um einen Faktor von 1.2 höher als bei den anderen ROVER(n). Hier ist wieder die Verstärkung des Modellierungsfehlers in Folge der genutzten Abtastrate von 10 Hz zu beobachten.

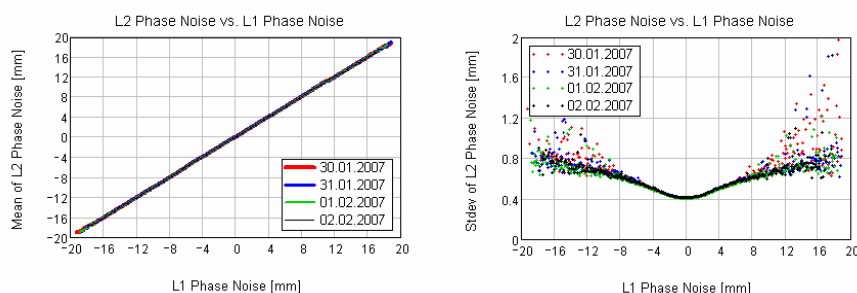


Fig. 4-44 L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an der Referenzstation an den 4 Messtagen

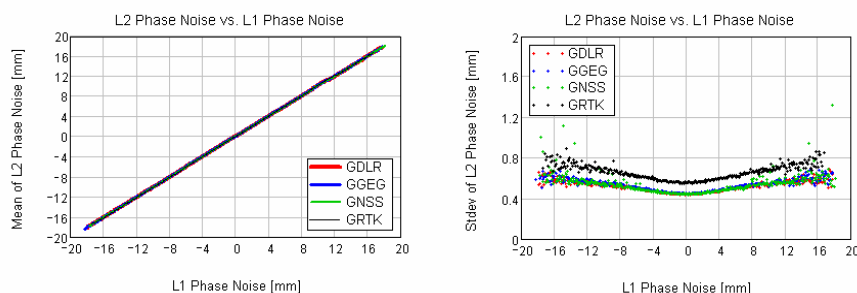


Fig. 4-45 L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 30.01.2007

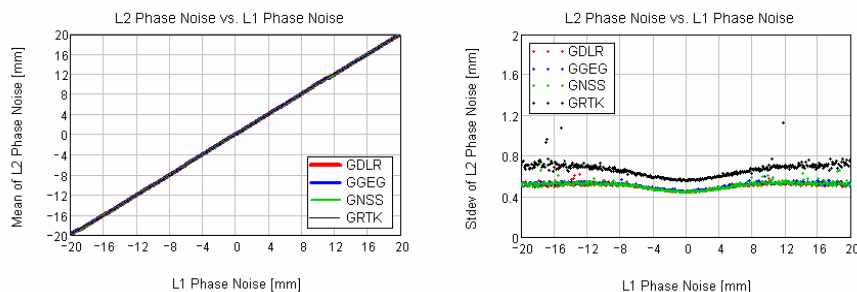


Fig. 4-46 L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 31.01.2007

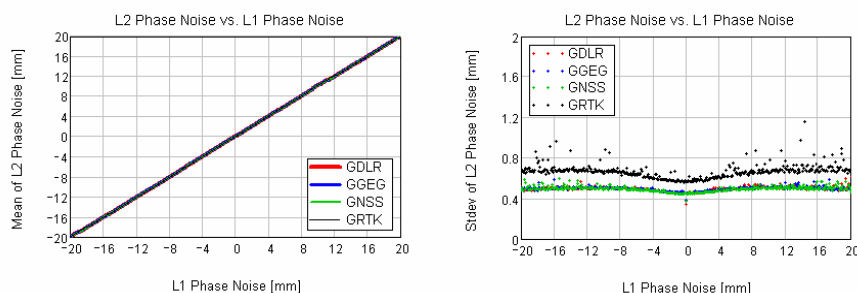


Fig. 4-47 L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 01.02.2007

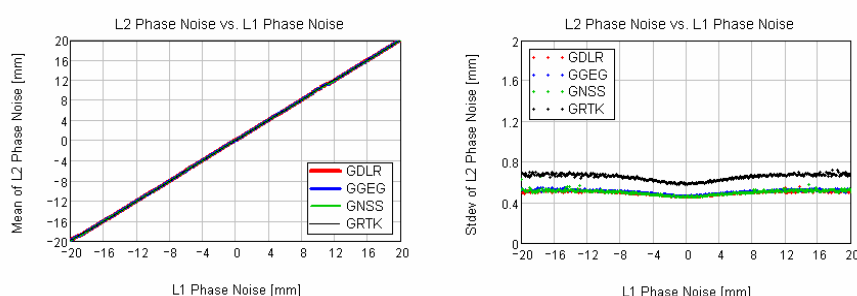


Fig. 4-48 L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an den ROVER(n) am 02.02.2007

In den Kurvenverläufen der Standardabweichung des L2-Phasenrauschens der Referenzstation und der ROVER sind weitere Unterschiede zu erkennen. Bei der Referenzstation an den Wertebereichsgrenzen des L1-Phasenrauschens ein überproportionaler Anstieg der Standardabweichung des L2-Phasenrauschens und eine zunehmende Streuung dieser zu beobachten. Die Streuung lässt sich dadurch erklären, dass an den Wertebereichsgrenzen des L1-Phasenrauschens auch die Anzahl zugeordneter L2-Phasenrauschwerte pro L1-Phasenrauschquantil bis auf 100 sinkt. Damit reduziert sich auch die Repräsentativität und Stabilität des Ergebnisses.

Während der Messkampagnen befand sich die Referenzstation an einem suboptimalen Standort, so dass umgebungsbedingte Signalstörungen bei einer zugelassenen Elevationsmaske von 5° insbesondere bei niedrigen Elevationswinkeln zu erwarten sind. Im Gegensatz dazu war die Antenne an Bord des Schiffes auf den Vordermast so montiert, dass Signalstörungen in Folge von Mehrwegeausbreitung durch Schiffsaufbauten weitestgehend unterdrückt wurden. Folglich könnte der überproportionale Anstieg der Standardabweichung des L2-Phasenrauschens bei der Referenzstation sich durch die Zunahme umgebungsbedingter Störungen bei niedrigen Elevationswinkeln erklären lassen. Dieser Effekt sollte dann auch bei der Standardabweichung des L1-Phasenrauschens auftreten.

Die in Fig. 4-49 exemplarische Gegenüberstellung der Standardabweichung des L1- und L2-Phasenrauschens belegt die hohe Korrelation zwischen diesen pro Empfänger. Der Vergleich der GBAS- und GDLR-Ergebnisse zeigt aber auch, dass eine Erklärung des überproportionalen Anstiegs der Standardabweichung des L2-Phasenrauschens bei niedrigen und hohen Quantifizierungswerten des L1-Phasenrauschens bei der Referenzstation zumindest nicht allgemeingültig mit erhöhten Signalstörungen erklärbar ist.

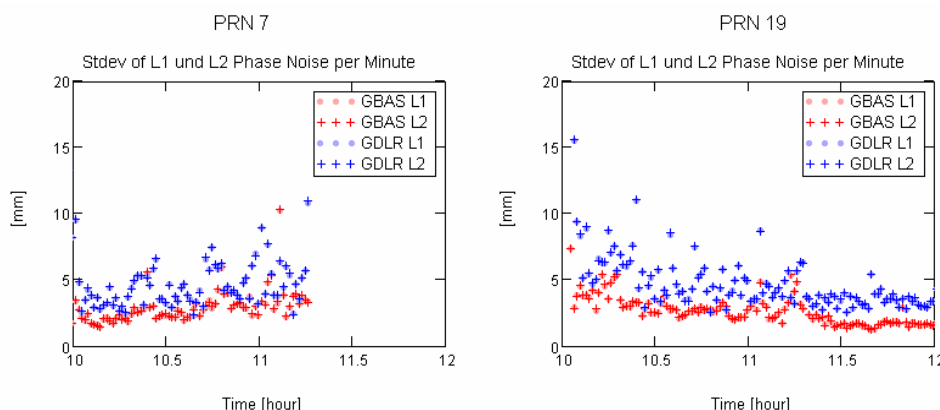


Fig. 4-49 Standardabweichung des L1- und L2-Phasenrauschens pro Minute an der Referenzstation und am ROVER-Empfänger GDLR für 2 ausgewählte Satelliten (30.01.2007)

Für die statistische Analyse wurden im Fall der Referenzstation jedoch die Messwerte des Gesamttagess herangezogen, während sich die Datenbasis bei den ROVER(n) auf die Messfahrten beschränkt. Um mögliche Einflüsse der Datenbasis auf die Ergebnisse zu bestimmen, wird in Fig. 4-50 der Zusammenhang zwischen der L2-Standardabweichung des Phasenrauschens und dem L1-Phasenrauschquantil für den GBAS- und den GDLR-Empfänger erneut jedoch mit veränderter Skalierung dargestellt. Beim GBAS-Empfänger wurden einerseits die Daten des Tages und andererseits nur die Daten genutzt, für die gleiche Messzeiträume mit dem GDLR-Empfänger vorausgesetzt werden können. Es kann damit nachgewiesen werden, dass eine Reduzierung der Datenbasis beim GBAS-Empfänger zu keinem wesentlich veränderten Stationsergebnis führt.

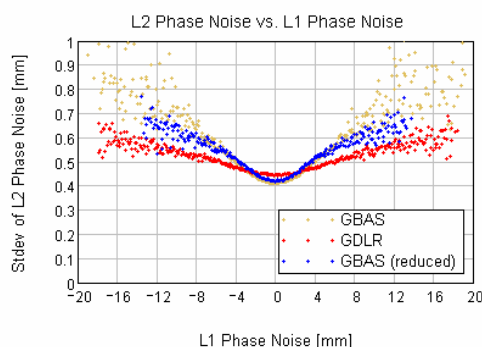


Fig. 4-50 L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an der GBAS und am GDLR (30.01.2007)

Wenn man jedoch einzelne Satelliten betrachtet (Fig. 4-51), so führt eine Begrenzung der Messdauer auf einige Stunden zum Wegfall ganzer Satellitendurchgänge unter hohen oder niedrigen Elevationswinkeln. Die Folge sind deutliche Unterschiede der satellitenspezifischen Ergebnisse zum Stationsergebnis.

Das Stationsergebnis ist folglich nur als Mittel über alle Satelliten aufzufassen.

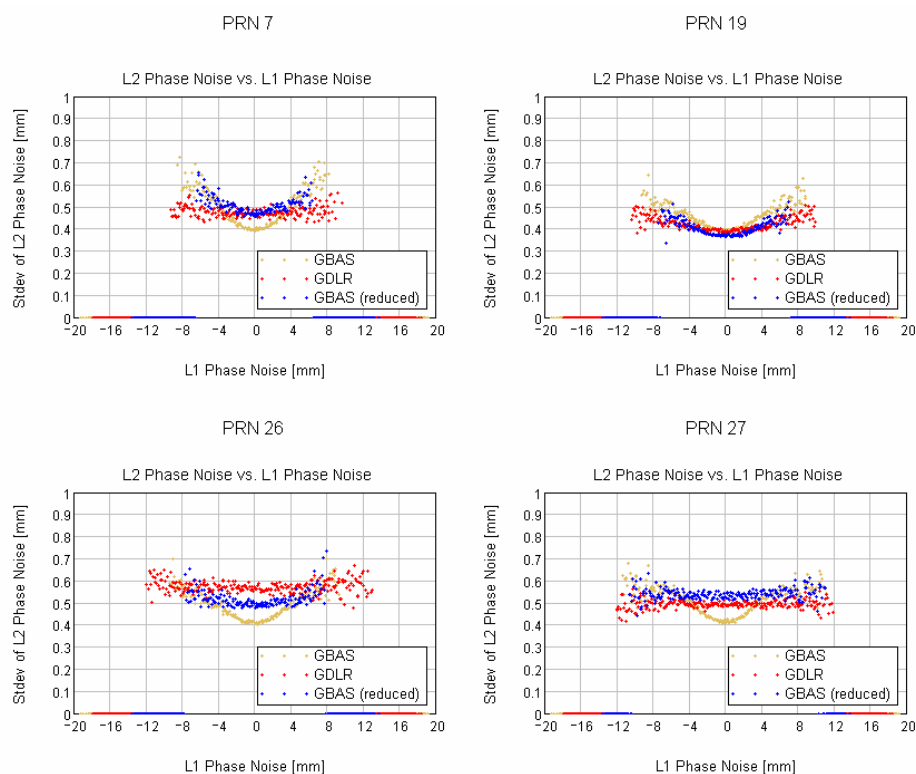


Fig. 4-51 L2-Phasenrauschen in Relation zum L1-Phasenrauschen an der GBAS und am GDLR für PRN 7, 19, 26 und 27 (30.01.2007)

SF 8

- Im geschätzten Phasenrauschen ist ein Modellierungsfehler enthalten, der mit zunehmender Phasendynamik steigt. Dieser verursacht die lineare Abhängigkeit zwischen Mittelwerten des L2-Phasenrauschens und zugeordneten Quantifizierungswerten des L1-Phasenrauschens. Da der Anstieg bei 1 liegt, kann ausgeschlossen werden, dass ionosphärische Fehler sich nicht signifikant abbilden.
- Beim Vergleich der Phasenqualität zwischen Referenzstation und ROVER(n) ist der Bezug zum Satelliten und Messzeitraum erforderlich, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

5 Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)

Das Signal-Rausch-Verhältnis ist eine die empfangene Signalstärke charakterisierende Messgröße. Der Empfänger gibt jeweils für das L1- und L2-Signal eine Signalstärke aus. Vorab wird sich auf die Analyse der Signalstärke des L1-Trägersignals (hier S1 genannt) beschränkt.

5.1 Messgenauigkeit des SNR¹³

Die ROVER-Empfänger wurden an einer Antenne betrieben. Wie bereits bei Voruntersuchungen für die Entwicklung des Amplitudenprozessors festgestellt wurde, können aufeinander folgende SNR-Werte durchaus über 2 oder mehrere Epochen identisch sein. Danach werden Sprünge des SNR-Wertes von bis zu einigen dB-Hz beobachtet, so dass die SNR-Werte selbst innerhalb eines kurzen Zeitraumes von z.B. 10 s im Bereich einiger dB-Hz schwanken. Für beide Effekte konnte bisher keine Systematik gefunden werden. Sie sind aber ein Indiz dafür, dass einerseits die Messgenauigkeit der SNR-Werte nicht unter der Ausgabegenauigkeit der SNR-Werte (0.1dB-Hz) liegen kann und dass andererseits die SNR-Werte nicht den Momentanwert direkt widerspiegeln. Um den Messfehler indirekt abzuschätzen, werden die unabhängigen Messwerte von jeweils 2 Empfängern für 2 ausgewählte Satelliten in Fig. 5-1 und Fig. 5-2 in ihrer Abhängigkeit untereinander dargestellt.

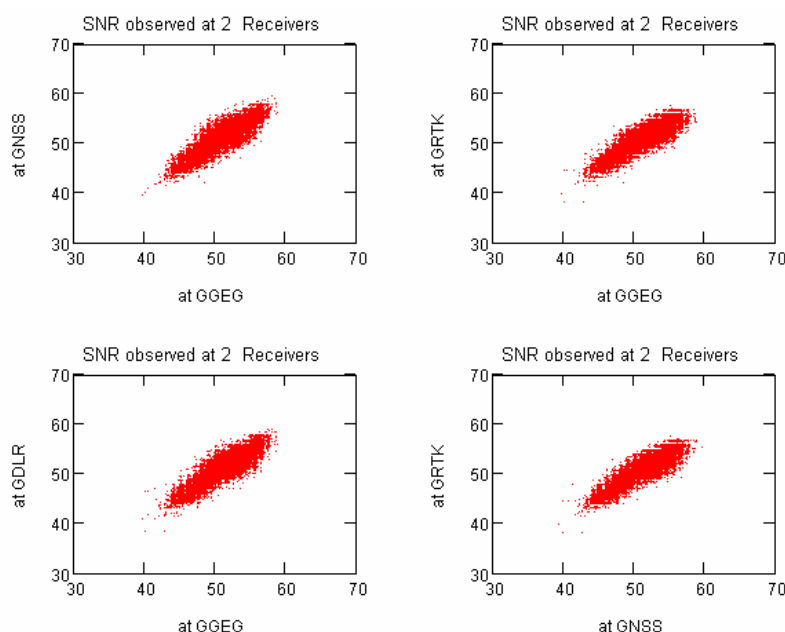


Fig. 5-1 SNR-Messungen an verschiedenen ROVER-Empfängern in Relation zueinander (PRN 3, 30.01.2007, bei GDLR SNR¹⁴ anstatt sonst SNR1)

¹³ Die Darstellungen beruhen auf extrahierten SNR-Angaben in der SNR_PRN.dat, die mit Hilfe von dependencies_SNR.dat für ausgewählte Satelliten dargestellt sind.

¹⁴ Erklärung folgt im Abschnitt 5.2.

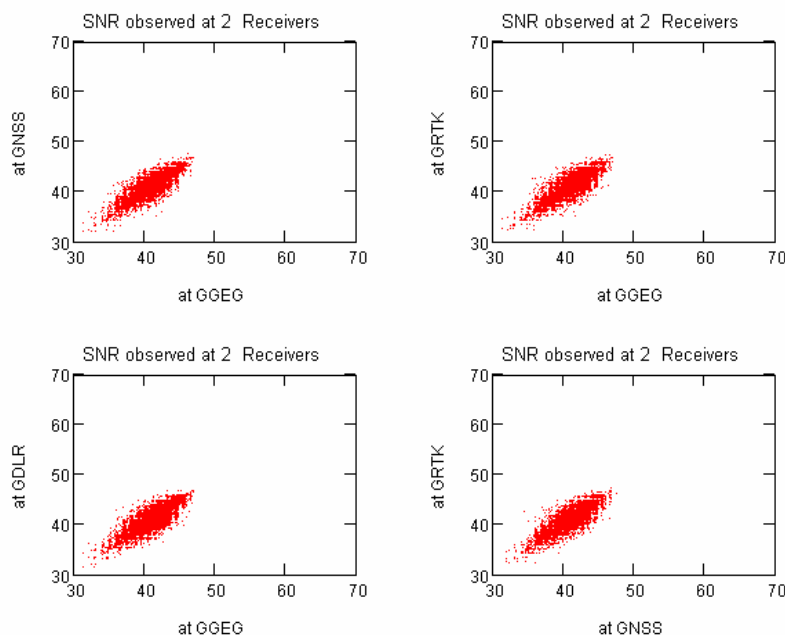


Fig. 5-2 SNR-Messungen an verschiedenen ROVER-Empfängern in Relation zueinander (PRN 26, 30.01.200, bei GDLR SNR0 anstatt sonst SNR1)

Abweichungen von mehreren dB-Hz sind zwischen den empfängerspezifischen Ausgaben in den Punktwolken erkennbar. Diese Aussage ist unabhängig von der gewählten Empfängerkombination.

Wird ein direkter Vergleich der Ergebnisse zweier Empfänger in ihrer Zeitabhängigkeit vorgenommen (siehe Fig. 5-3), so zeigt sich, dass das Zeitverhalten der unabhängig gemessenen SNR's trotzdem einer gemeinsamen Grunddynamik als Funktion der Zeit folgt. In der Differenzbildung wird darüber hinaus erkennbar, dass Abweichungen größer 1dB-Hz eher die Ausnahme sind. Für diese Stunde gilt, dass die mittlere Abweichung der SNR-Werte beider Empfänger unter 0.1 dB-Hz, also unter der formatbedingten Genauigkeitsauflösung liegt. Die Standardabweichung der Differenz beträgt immerhin rund 1dB-Hz. Bereits damit sind momentane Unterschiede in den SNR-Werten zweier Empfänger von bis zu 4dB-Hz rein aus der Messgenauigkeit begründbar.

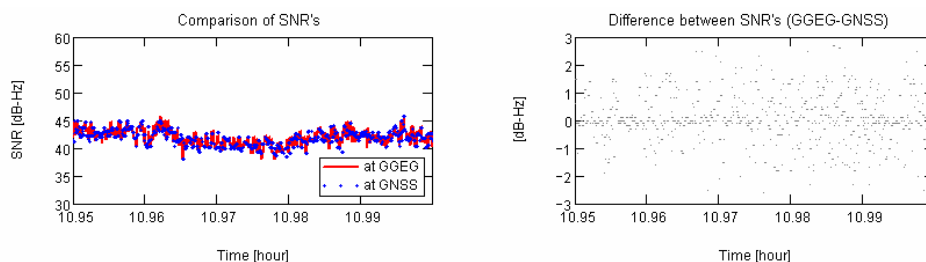


Fig. 5-3 Differenz der SNR-Messungen vom GEGG und GNSS (PRN 26, 30.01.2007)

Um diese Problematik zu reduzieren, werden SNR-Vergleiche im Folgenden anhand von Kurzzeitmittelwerten (z.B. pro Minute) und zugeordneten Standardabweichungen vorgenommen.

5.2 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR für L1-Messungen¹⁵

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR-Mittelwertes pro Minute

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des mittleren SNR pro Minute (Fig. 5-4, rote Kurve), die auf der Grundlage aller Messdaten eines Tages ermittelt wurde, ist an der Referenzstation an allen 4 Tagen nahezu identisch.

Den blauen Kurven liegen nur die Daten zugrunde, die während der Messfahrt des Forschungsschiffes aufgezeichnet wurden. Die Kurvenunterschiede sind damit in der reduzierten Datenbasis begründet. Es zeigt sich aber auch, dass ein Messzeitraum von mehr als 7 Stunden in mittleren Breiten bereits Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen liefert, die dem Tagesverhalten der Station sehr nahe kommen.

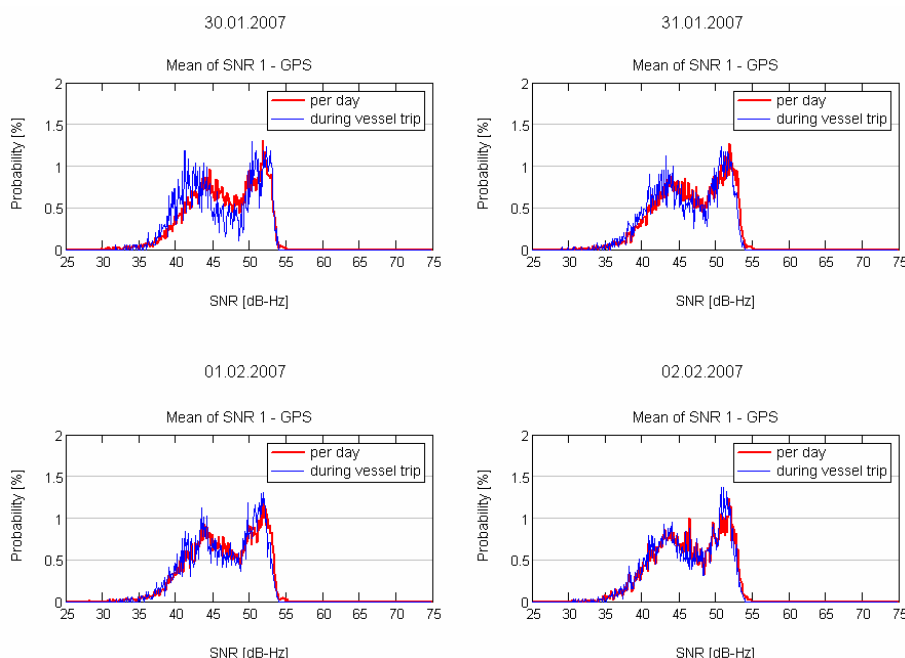


Fig. 5-4 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an der Referenzstation an den 4 Messtagen

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des SNR an den ROVER(n) für den 30.01.2007 sind in Fig. 5-5 dargestellt. Beim GDLR ist ein völlig anderer Wertebereich zu beobachten, der sich höchstens durch den Einsatz einer anderen Firmware und damit einem anderen Dateninhalt erklären lässt.

¹⁵ Grundlage sind die Daten in den Files `sigmaSNR_PRN.dat`, die mit Hilfe von `sigmaSNR_xcmd` dargestellt bzw. ausgewertet wurden.

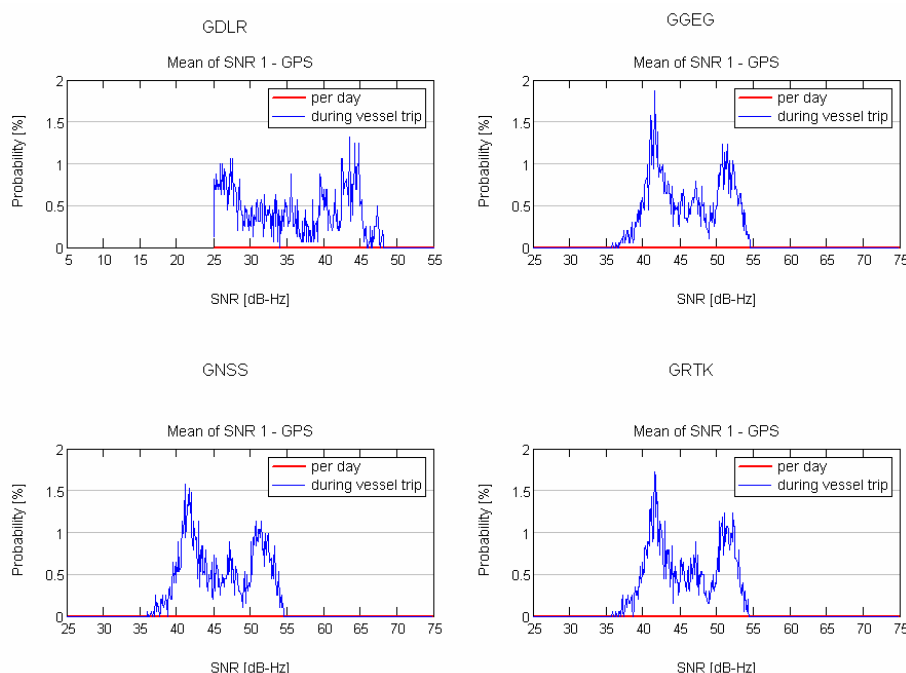


Fig. 5-5 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 30.01.2007

Betrachtet man die zugeordneten RINEX-Files, so werden S1- und S2-Werte für die Empfänger GBAS, GGEG, GNSS und GRTK angeboten. Beim GDLR, der mit einer speziellen Firmware arbeitet, erfolgt die Ausgabe von **S0**-, **S1**- und **S2**-Werten. Die S0-Werte beim GDLR bei dieser Ausgabe entsprechen den S1-Werten von der Firmware 3.1 (GGEG, GNSS, GRTK und GBAS). Dies belegt der folgende Auszug aus den RINEX-Files vom GDLR und GGEG am 31.01.2007.

Spez. Firmware

```
07 01 31 08 00 0.0000000 0 14G 2G 5G 6G 7G10G12G13G16G21G23G24G25
G30G31
24279116.180 24279116.100 2 24279118.400 6 127587598.542 2 99418925.085 6
-3385.106 -2637.745 43.700 27.300 29.000
24727716.980 24727716.280 2 24727720.020 6 129944998.301 2 101255853.640 6
-3736.757 -2911.759 42.500 26.900 26.500
```

Firmware 3.1

```
07 01 31 08 00 0.0000000 0 15G 2G 5G 6G 7G10G12G13G16G21G23G24G25
G30G31R79
24306530.980 24306531.1202 24306533.0406 127731668.14326 99531183.68763
-3421.850 -2666.408 42.400 29.000
24755131.860 24755130.9002 24755134.4806 130089057.87326 101368112.22963
-3773.865 -2940.714 43.600 26.200
```

SF 9	<ul style="list-style-type: none"> Obwohl die Rohdaten beider Empfänger mit dem gleichen RINEX-Dekoder in RINEX transformiert wurden, sind Unterschiede in der Zuordnung der Dateninhalten erkennbar, die firmwareabhängig sind.
-------------	---

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion an den Folgetagen (Fig. 5-6 bis Fig. 5-8) wird anhand der Ergebnisse vom GNSS- und GRTK-Empfänger dargestellt.

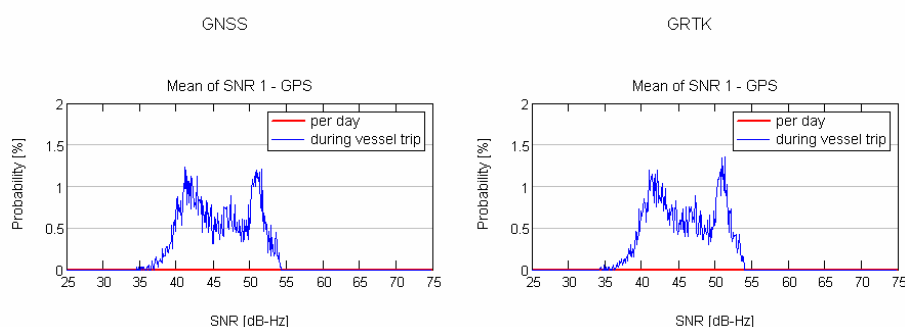


Fig. 5-6 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 31.01.2007

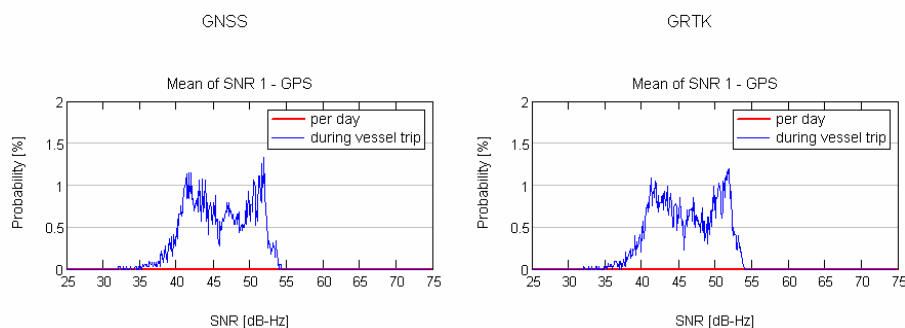


Fig. 5-7 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 01.02.2007

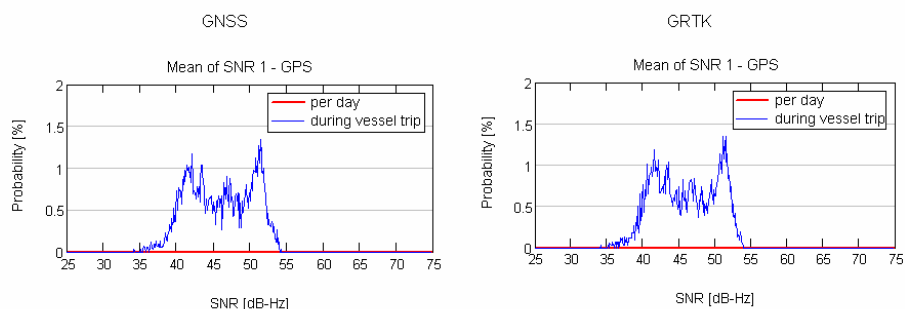


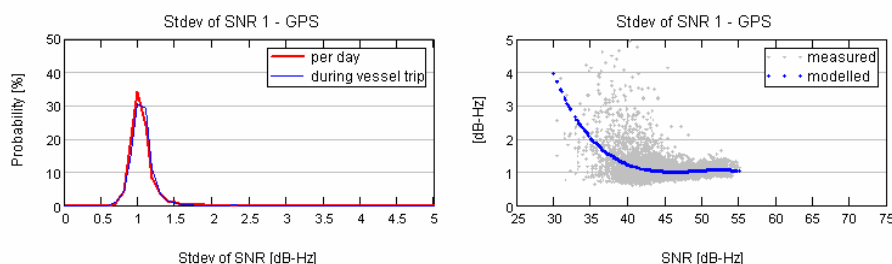
Fig. 5-8 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des SNR (Mittelwert pro Minute, GPS) an den ROVER(n) am 02.02.2007

Die Messzeiträume variieren an Folgetagen bezüglich ihrer Dauer. Es gibt gemeinsame Zeiträume, für die eine identische Satellitenkonstellation bei GPS vorlag. Es zeigt sich, dass sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen weder zwischen den ROVER-Empfängern noch zwischen den Messtagen gravierend unterscheiden. Dies ergint auch eine Sichtung der nicht dargestellten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des GGEG (S1) und des GDLR (S0). Der Einfluss von Unterschieden in der Datenbasis kann damit bei SNR-Werten ausgeschlossen werden.

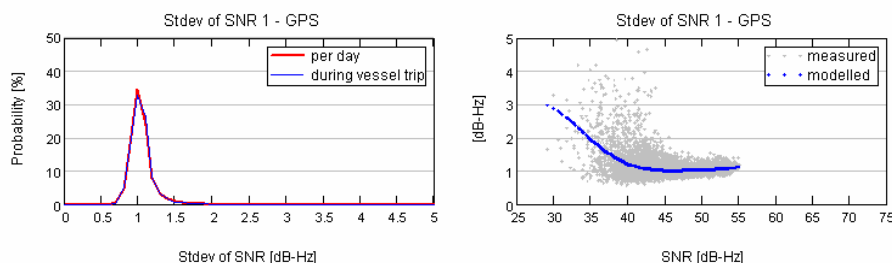
Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute

In Fig. 5-9 sind die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute und ergänzend der Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR pro Minute für die Referenzstation an allen 4 Messtagen dargestellt.

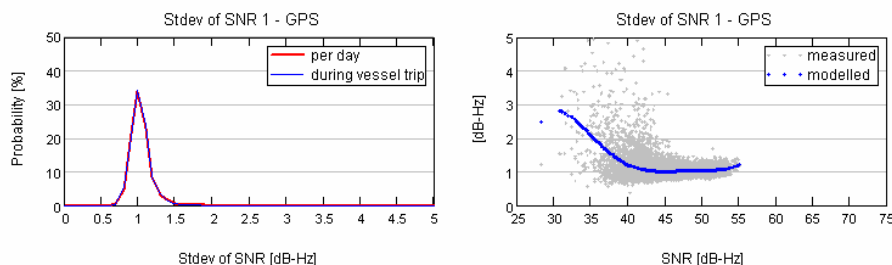
30.01.2007



31.01.2007



01.02.2007



02.02.2007

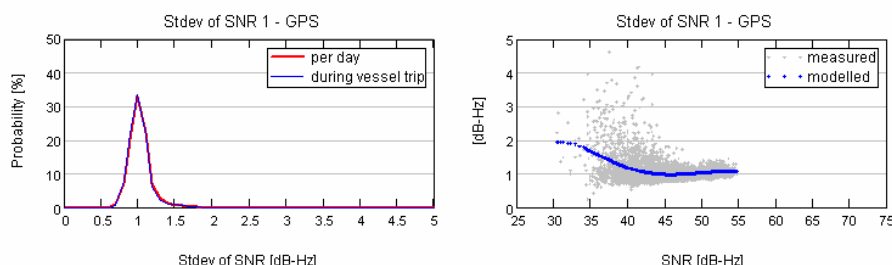


Fig. 5-9 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an der Referenzstation sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR

An allen 4 Tagen gilt, dass die Standardabweichung des SNR sein Maximum bei 1dB-Hz hat. Werte über 1.5 dB-Hz sind die Ausnahme. Beim messwertbezogenen Zusammenhang

zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (rechte Grafiken) kann festgestellt werden, dass für SNR-Werte über 45 dB-Hz seine Standardabweichung vorwiegend unter 1.5 dB-Hz liegt. Unter 45 dB-Hz ist eine deutliche Zunahme der Variation der SNR-Werte bis zu 5 dB-Hz zu beobachten. Wenn man jedoch die Wahrscheinlichkeitsdichte der Standardabweichung des SNR (linke Grafik) betrachtet, sind Werte über 1.5 dB-Hz eher die Ausnahme. Da die Punktwolken keinen Rückschluss auf die Häufigkeit von dargestellten Werten zulassen, wurde der Zusammenhang zwischen SNR und seiner Standardabweichung durch ein Polynom der Ordnung 5 modelliert (blaue Kurve in rechter Grafik). Tagesspezifische Besonderheiten werden insbesondere bei SNR-Werten unter 35 dB-Hz erkennbar, die das Anstiegsverhalten der Standardabweichung bei abnehmenden SNR betreffen. Ob diese wirklich tagesspezifische Besonderheiten abbilden, ist eher unwahrscheinlich, wenn man die Datenbasisproblematik beachtet. Bereits aus den Punktwolken für SNR-Werte unter 40 dB-Hz ist ein Absinken der Anzahl zugeordneter Messwertpaare erkennbar, so dass die Polynomapproximation dort zwangsläufig insatbiler und weniger repräsentativ ist.

Eine Sichtung der ROVER-Ergebnisse zeigte, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der SNR-Standardabweichung sowie der Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Mittelwert des SNR weitestgehend unabhängig vom Tag und vom Empfänger sind. Deshalb werden im Folgenden nur die Ergebnisse vom GNSS und vom GRTK dargestellt (Fig. 5-10 bis Fig. 5-13, linke Grafiken). Das Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der SNR-Standardabweichung hat sich zu 1.3 dB-Hz verlagert und fällt niedriger aus. Ein flacherer Kurvenverlauf ist die Folge, der effektiv das Auftreten von höheren Standardabweichungen des SNR beschreibt.

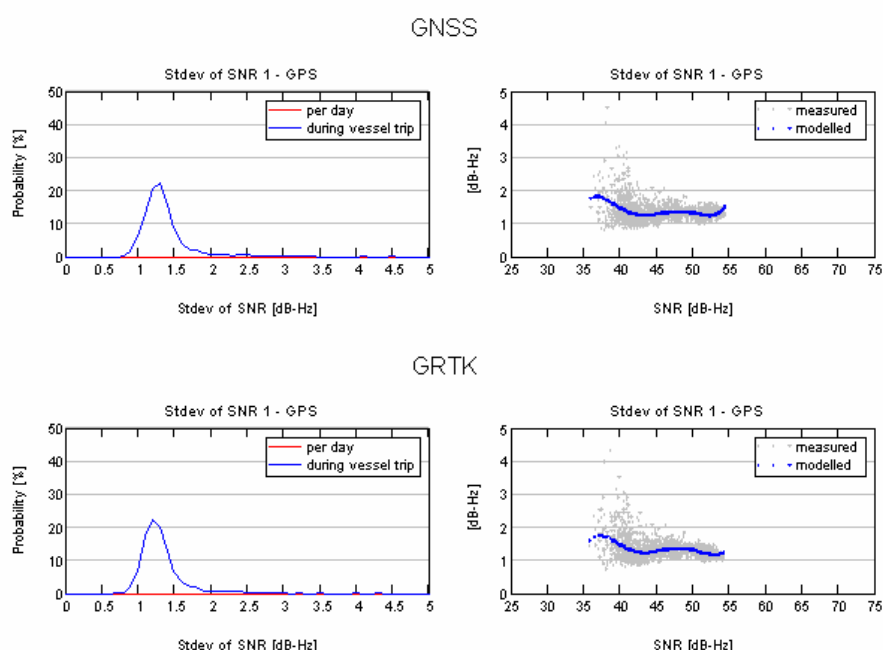


Fig. 5-10 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (30.01.2007)

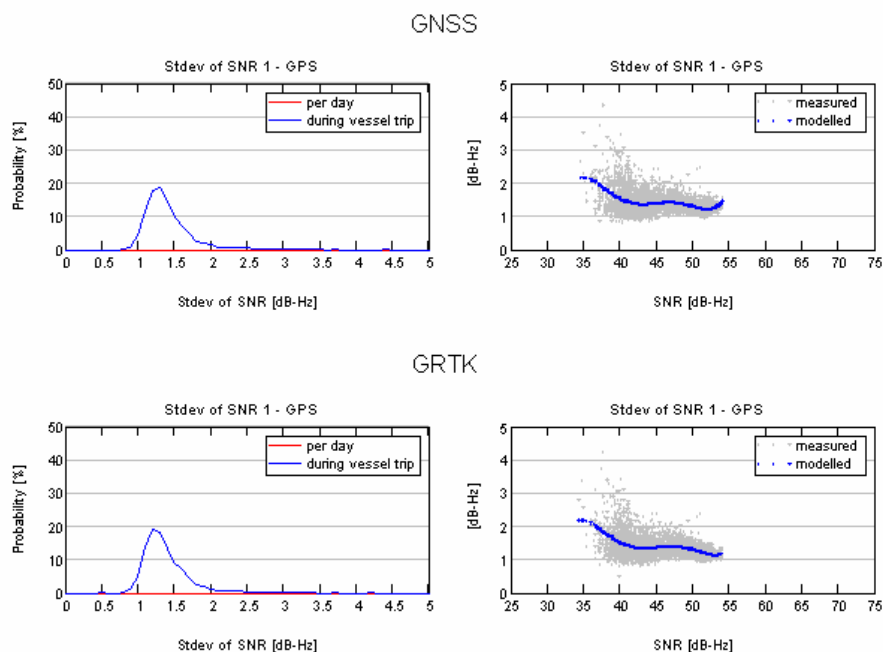


Fig. 5-11 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (31.01.2007)

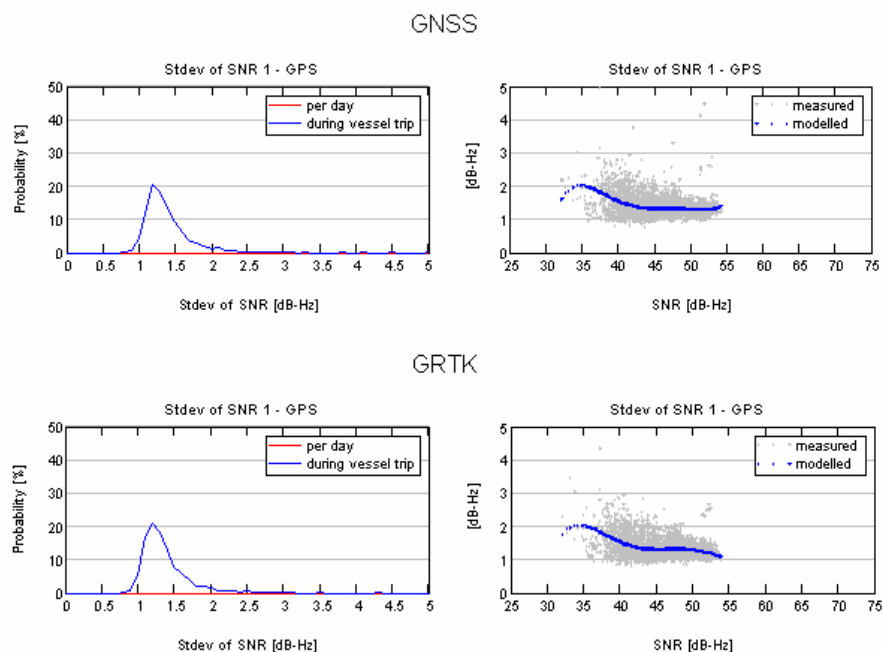


Fig. 5-12 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (01.02.2007)

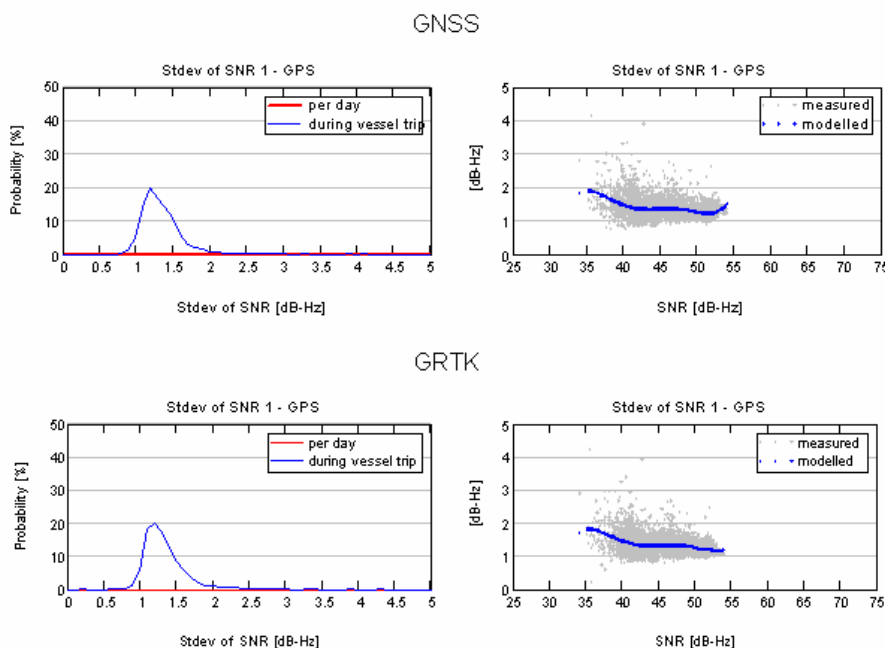


Fig. 5-13 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung des SNR pro Minute an den ROVER-Empfängern sowie Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung des SNR (02.02.2007)

In den Punktwolken der rechten Grafiken sind kaum tagesspezifische Besonderheiten erkennbar. Der Wertebereich der SNR-Mittelwerte erstreckt sich bei den ROVER(n) von 35 dB-Hz bis knapp 55 dB-Hz. Bei der Referenzstation liegt die obere Wertebereichsgrenze bei 55 dB-Hz während Minimalwerte von bis 30 dB-Hz gemessen wurden.¹⁶

Für SNR-Werte über 45 dB-Hz kann behauptet werden, dass die Standardabweichung vorwiegend unter 2 dB-Hz liegt. Wird das Verhalten durch ein Polynom 5. Ordnung modelliert, so zeigt sich einerseits, dass die Standardabweichung des SNR der ROVER für SNR-Werte größer 45 dB-Hz im Vergleich zur Referenzstation erhöht ist und dass andererseits sich bei niedrigen SNR-Werten sich veränderte Kurvenverläufe ergeben.

Durch die fehlenden Messwerte unter 35 dB-Hz bei den ROVER(n) wird hier das Anstiegsverhalten der Standardabweichung mit abnehmenden SNR kaum erfasst. Die Folge ist, dass die Polynomapproximation sich einerseits stärker an den Variationen im gemessenen Wertebereich des SNR anpasst. Andererseits führt die zu geringe Datenbasis bei SNR-Werten unter 40 dB-Hz auch zu nicht verlässlichen Modellierungen.

Durch den Einsatz eines aktiven Antennenverstärkers bei den ROVER(n) ist eine direkte Vergleichbarkeit mit den SNR-Werten der Referenzstation nicht gegeben. Auch die höhere Streuung der SNR-Werte kann folglich ein Ergebnis der eingesetzten Antennverstärker sein.

¹⁶ Bei den ROVER(n) wurde ein aktiver Antennenverstärker eingesetzt, um die Dämpfungseffekte von notwendigen Kabellängen größer 20 m (Antenne auf Vordermast, Empfänger in Brücke) zu kompensieren.

5.3 Standardabweichung des SNR pro Minute als Funktion der Zeit¹⁷

Bei niedrigen Elevationswinkeln ist mit einem höheren Phasenrauschen zu rechnen, während gleichzeitig dort ein geringeres SNR in Folge geringerer Signalleistung und eine höhere SNR-Variation zu erwarten ist.

Referenzstation

Da sich zumindest bei der Referenzstation der GPS-Empfang an Folgetagen mit der gleichen Satellitenkonstellation wiederholte, kann ein satellitenspezifischer Vergleich hilfreich zur Identifikation von temporären Störungen sein.

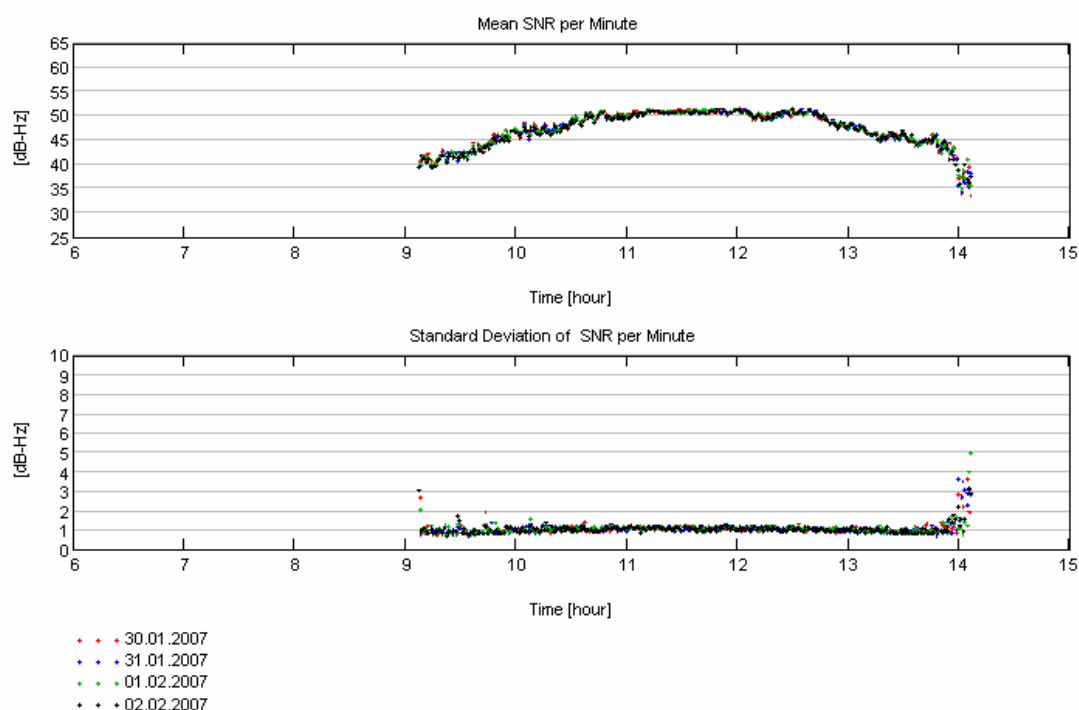


Fig. 5-14 Mittelwert und Standardabweichung des SNR vom PRN 18 an der Referenzstation im Zeitraum vom 30.01. bis 02.02.2007

Bei vielen Satellitensignalen, die an der Referenzstation empfangen wurden, folgt das SNR (Mittelwert und Standardabweichung pro Minute) einem ähnlichen Verlauf an Folgetagen, wenn man den täglichen Zeitversatz von ca. 4 Minuten beachtet (siehe Fig. 5-14). Zu Zeiten des Satellitenauf- und -untergangs werden die geringsten SNR-Werte aber auch die höchsten Standardabweichungen beobachtet. Satellitensignale, die nur unter geringen Elevationswinkeln empfangen werden (erkennbar an der Länge des Satellitendurchgangs), weisen folglich eine erhöhte Variation der Standardabweichung auf, die eine Interpretation bezüglich Änderungen im Störungspotenzial als nicht gerechtfertigt erscheinen lassen (siehe Fig. 5-15).

¹⁷ Grundlage sind die Daten in den Files `sigmaSNR_PRN.dat`, die Mittelwert und die Standardabweichung des SNR S1 pro Satelliten enthalten. Ihre Darstellung erfolgte mit `compare_sigmaSNR.xmcd`, in der auch die Gegenüberstellung hochratiger Daten aus `PRN_PRN_FF(HH).dat` und `SNR_PRN.dat` erfolgt.

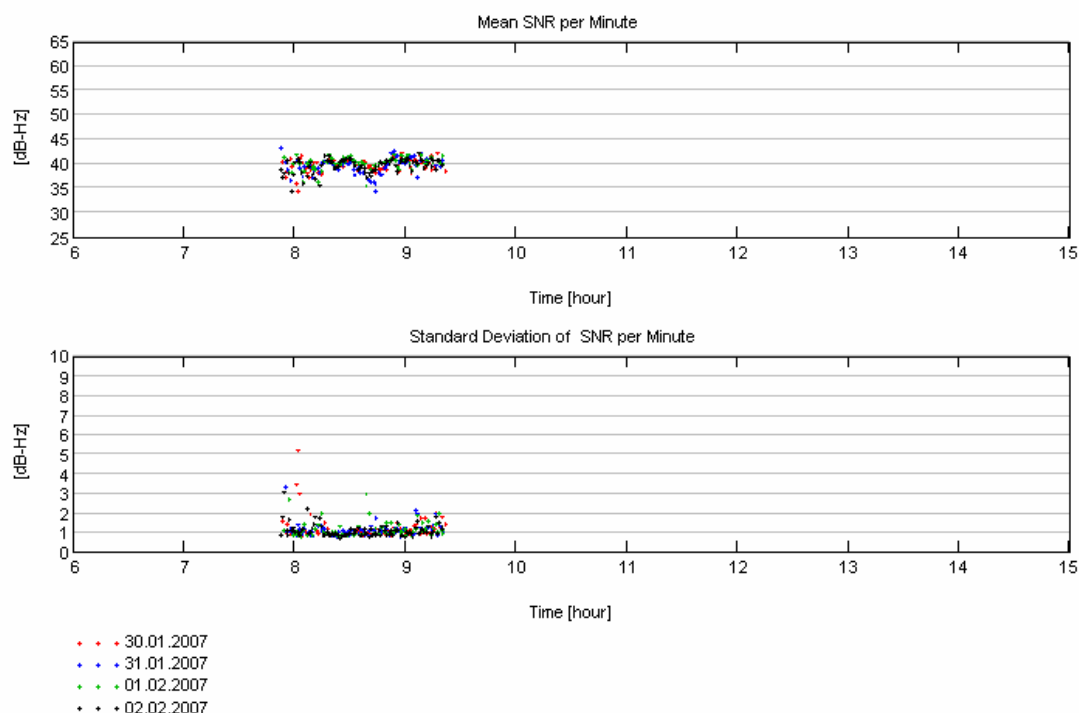


Fig. 5-15 Mittelwert und Standardabweichung des SNR vom PRN 14 an der Referenzstation im Zeitraum vom 30.01. bis 02.02.2007

Des Weiteren gibt es deutlich erhöhte, jedoch nur kurzzeitig auftretende Erhöhungen der Standardabweichungen des SNR (siehe Fig. 5-16 gegen 8:00 UT). Hier liegt der Verdacht nahe, dass diese eine systematische Ursache haben, jedoch unter Beachtung der zugeordneten Satellitenkonstellation nur einige Satelliten betreffen und auch nicht völlig zeitsynchron auftreten. Solche Messzeitpunkte sind:

- PRN 1: um 5:00 UT
- PRN 3: um 10:00 UT
- PRN 9: um 1:00 UT
- PRN 14: um 3:30 UT
- PRN 15: um 8:00 UT
- PRN 16: um 8:00 und 16:00 UT
- PRN 18: zwischen 0:00 und 2:00 UT
- PRN 21: um 10:00 UT
- PRN 22: um 0:30 UT und 3:30 UT
- PRN 28: um 14:00 UT
- PRN 29: um 22:00 UT
- PRN 30: um 3:30 UT

SF 10

- Eine Georeferenzierung oben genannter Satelliten ist erforderlich, um den Richtungs- und Zeitbezug erhöhter und kurzzeitig auftretender SNR-Schwankungen endgültig zu klären.

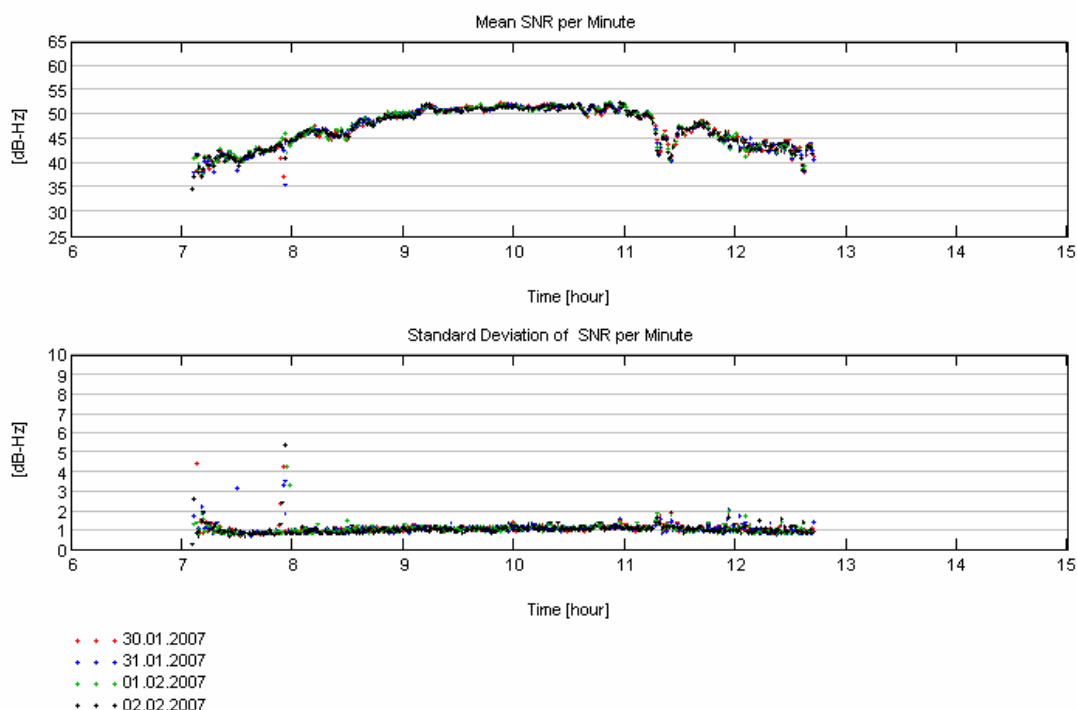


Fig. 5-16 Mittelwert und Standardabweichung des SNR vom PRN 16 an der Referenzstation im Zeitraum vom 30.01. bis 02.02.2007

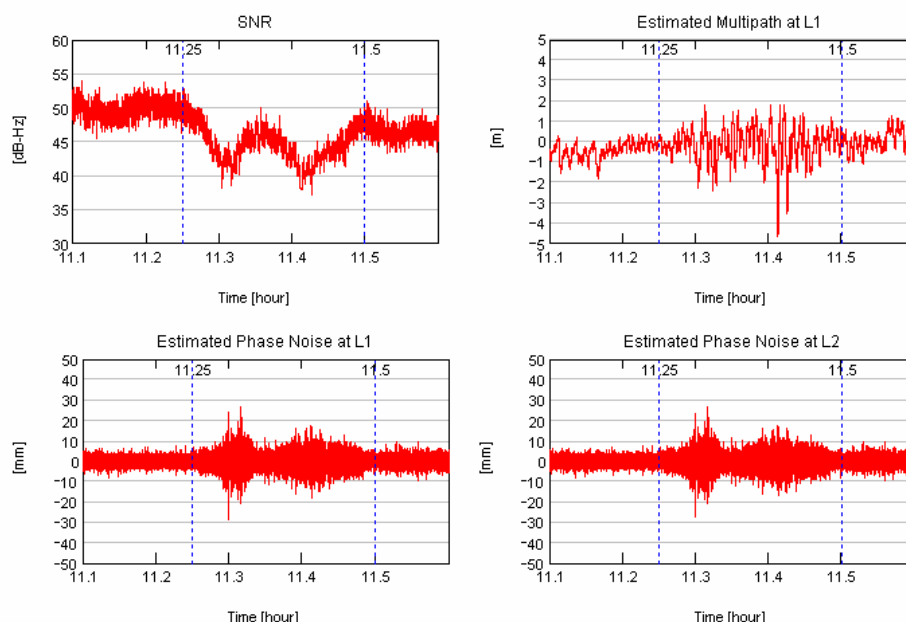


Fig. 5-17 Momentanwert des SNR und zugeordnetes Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 16, Referenzstation, 30.01.2007)

Darüber hinaus ist ein signifikanter Sonderfall zu beobachten, der sich auch im Minutenmittelwert des SNR abbildet. Beim PRN 16 tritt ein deutlicher Einbruch des SNR an allen Tagen um ca. 11:20 UT auf, der mehr als 5 dB-Hz beträgt und sich zusätzlich wie eine Schwingung

verhält (siehe Fig. 5-16). In Fig. 5-17 ist der Momentanwert des SNR sowie zugeordnet das Phasenrauschen auf beiden Trägern und der geschätzte Mehrwegefehler auf L1¹⁸ dargestellt. Beim Abfall des SNR ist ein deutlich erhöhtes Phasenrauschen auf beiden Trägern bis in den Bereich von 2 cm zu beobachten. Auch der geschätzte Mehrwegefehler weist während dieser Zeit erhöhte Werte bis zu einigen Metern auf. Durch die Wiederholbarkeit an Folgetagen im gleichen geometrischen Bezug kann in diesem Fall auf eine umgebungsbedingte Signalstörung, also auf das Auftreten von Mehrwegeausbreitung, geschlossen werden. Der Nachweis, dass der Slant TEC in diesem Zeitraum nahezu linear verläuft und dieser Effekt bei den ROVER(n) nicht auftritt, unterstützt diese These.

SF 11 Dem SNR-Einbruch um mehr als 5 dB beim PRN 16 sind ein erhöhtes Phasenrauschen und ein erhöhter Mehrwegefehler zugeordnet. Seine Wiederholbarkeit im gleichen geometrischen Szenario, sein Nichtauftreten bei den ROVER-Messungen sowie der Ausschluss anderer Fehlerquellen belegen, dass es sich hier um die Auswirkung von Mehrwegesignalausbreitung handelt. Die Störquelle ist durch Georeferenzierung zu identifizieren.

Alternativ können Störungen auch anhand der Abweichung der Standardabweichung des SNR vom Normalverhalten $\text{stdev}(\text{SNR})=f(\text{SNR})$ bestimmt werden. Das Verfahren zur Bestimmung des Normalverhaltens pro Tag ist in Kapitel 10 (Anlage B) beschrieben.

Wenn ein SNR-Abfall mit einer Erhöhung der Standardabweichung korreliert ist und dabei dem Normalverhalten folgt, würde dieses Ereignis als Normalfall klassifiziert und nicht erkannt. Eine erhöhte Standardabweichung kann aber auch detektiert werden, obwohl sie optisch kaum erkennbar ist. Folglich muss erwartet werden, dass detektierte Sonderfälle anhand von SNR-Abfällen nicht zwangsläufig mit detektierten Sonderfällen anhand erhöhter SNR-Standardabweichungen identisch sein müssen.

In Fig. 5-18 sind die Zeitpunkte an der Referenzstation dargestellt, für die eine erhöhte Standardabweichung des SNR pro Minute (Grenzwert 4-sigma) in Relation zum Tagesverhalten festgestellt wurde. Eine Vielzahl solcher Zeitpunkte ist Phasen des Satellitenauf- oder Untergangs zugeordnet. Dabei kann nicht ausgeschlossen werden, dass dafür die schlechtere Approximation durch das Polynom bedingt durch die reduzierte Datenbasis bei niedrigen Elevationswinkeln verantwortlich ist.

Weiterhin sind Zeitpunkte ausgewiesen, bei denen entweder eine erhöhte SNR-Variation an allen 4 Tagen zu beobachten war oder sie eine zeitliche Nähe zu CSD-Neustarts aufweisen (grün umrandete Beispiele).

¹⁸ Der geschätzte Mehrwegefehler wurde aus dem Stundendatensatz als Differenz zwischen Code- und Trägerphasenmessung, bereinigt um den Ionosphärendrift ermittelt, und wird mittelfreig dargestellt.

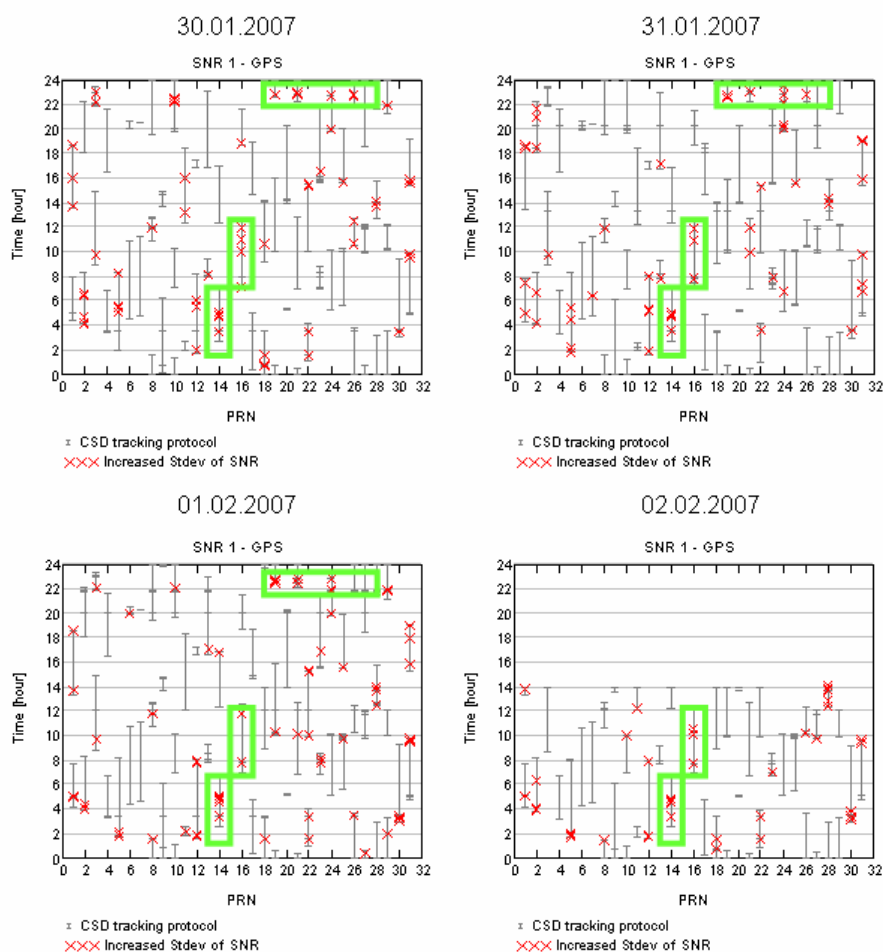


Fig. 5-18 Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD¹⁹ (Referenzstation)

Folglich erscheint es sinnvoll, ausgewählte Beispiele im Detail zu betrachten.

Beim PRN 14 wurde gegen 4:24 UT eine leicht erhöhte Standardabweichung des SNR detektiert, die im Verlauf des reinen SNR nicht erkennbar ist (siehe Fig. 5-19). Dem zugeordnet ist eine leichte Erhöhung des Phasenrauschens sowohl auf L1 als auch auf L2 zu beobachten. Im Zeitverlauf des geschätzten Mehrwegefehlers auf L1 ist im Gegensatz dazu keine ausgeprägte Erhöhung erkennbar.

Beim PRN 24 (Fig. 5-20) wurde an allen Tagen nach 22:00 UT ebenfalls eine erhöhte Standardabweichung detektiert. Hier ist ab 22:36 ein schwingungsähnliches Verhalten im SNR zu beobachten. Gegen 22:45 Uhr sinkt das SNR kurzzeitig auf bis 25 dB-Hz und das Phasenrauschen steigt bis zu 5 cm. Danach stellt der Empfänger einige Epochen keine Messwerte der Trägerphase zur Verfügung, so dass der CSD einen Neustart ausführen muss. Zeitlich zugeordnet ist eine deutliche Zunahme des Mehrwegefehlers bis in den Bereich einiger Meter zu beobachten.

¹⁹ Der für die Detektion verantwortliche Cycle Slip Detektor erzeugt als ein Nebenprodukt ein so genanntes Tracking-Protokoll (Availability.dat), in dem die Zeitmarken der ersten und der letzten Phasenmessung für ein zusammenhängendes Phasensegment angegeben werden.

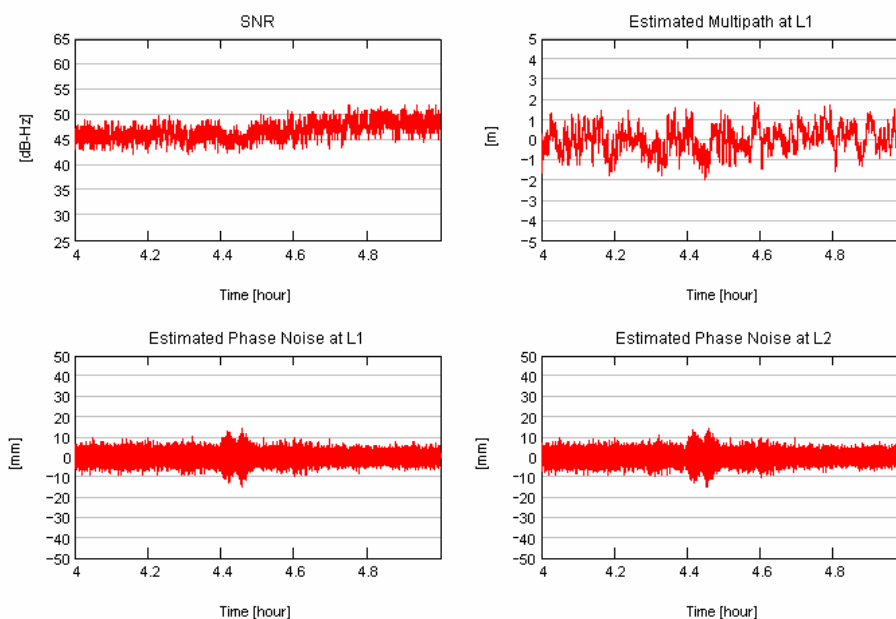


Fig. 5-19 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 14, Referenzstation, 30.01.2007)

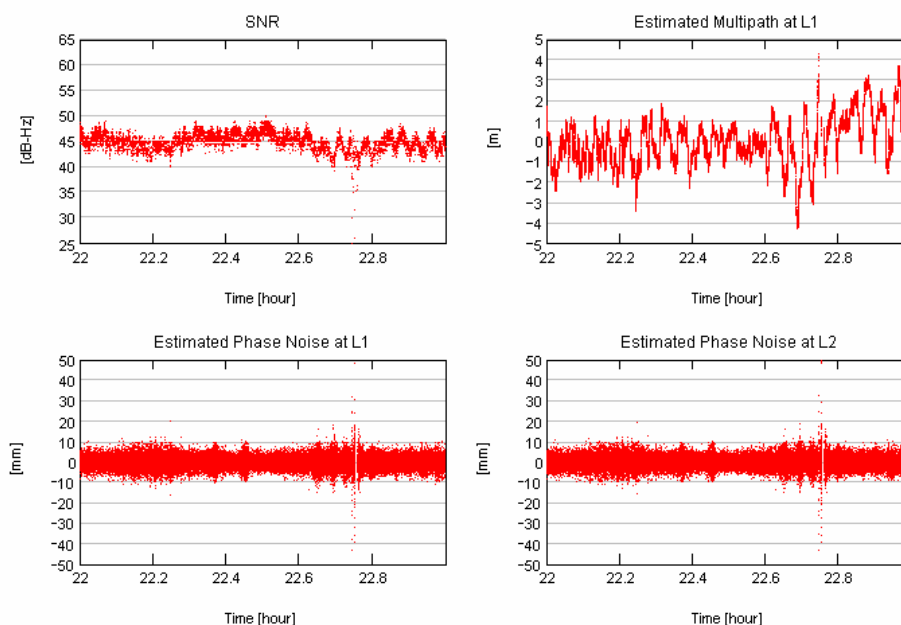


Fig. 5-20 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 24, Referenzstation, 30.01.2007)

SF 12

Eine Georeferenzierung erhöhter SNR-Standardabweichung wird empfohlen, um vertiefende Erklärungen für Ihr Auftreten ableiten zu können.

Rover-Empfänger

Bei den ROVER-Empfängern ist ein Erkennen von Ausreißern aus den Zeitverläufen erschwert, weil einerseits die Wiederholbarkeit gleicher Empfangsbedingungen an Folgetagen nicht gegeben ist und weil andererseits die SNR-Werte selbst stärker streuen.

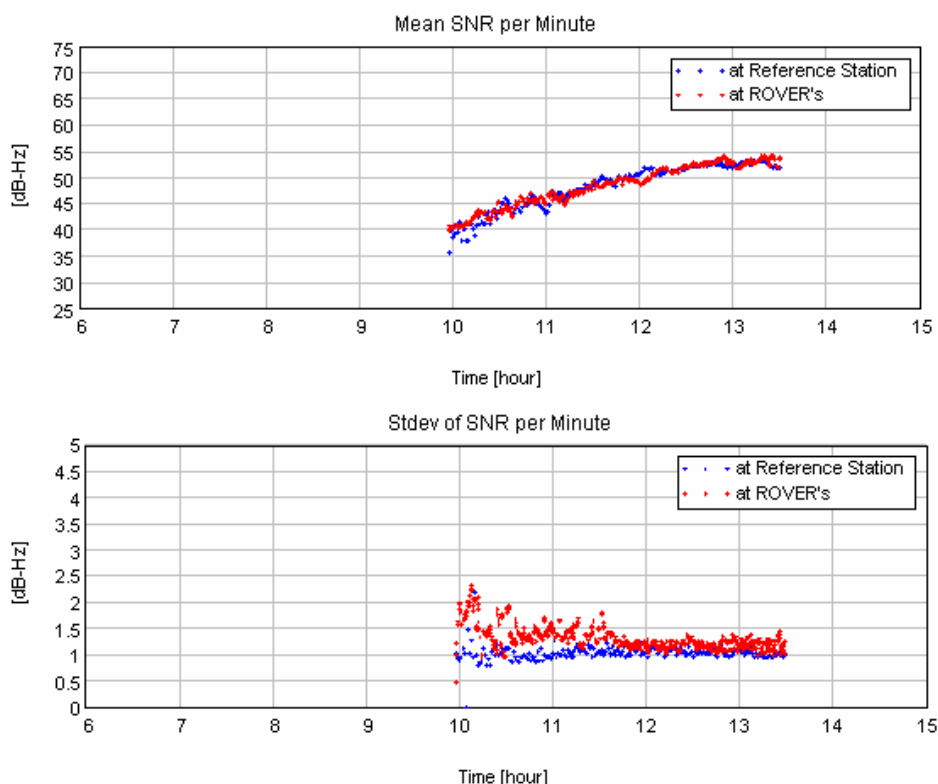


Fig. 5-21 SNR und seine Standardabweichung gemessen an der Referenzstation und an den ROVER(n) am 31.01.2007 (PRN 19)

Eine Gegenüberstellung mit den zeitgleichen Ergebnissen der Referenzstation ist ein denkbarer Ansatz. So weichen z.B. beim PRN 19 um 12 Uhr die SNR-Werte der Referenzstation und der ROVER-Empfänger um ca. 2 dB-Hz voneinander ab (siehe Fig. 5-21), während bei den Standardabweichungen keine Anomalien erkennbar sind.

Bei Satellitendurchgängen unter niedrigen Elevationswinkeln (siehe Fig. 5-22) liegt die Standardabweichung des SNR bei den ROVER(n) generell über denen der Referenzstation, die SNR's der Referenzstation und der ROVER schwanken mehr oder weniger stark umeinander bei einem vergleichbaren prinzipiellen Verlauf. Durch die fehlende Stabilität und Signifikanz dieses Vergleichs sowie durch Unterschiede im Messaufbau (Einsatz eines aktiven Antennenverstärkers bei den ROVER(n)) wird folglich auf die Detektion von Störungen mittels dieser Methode verzichtet.

Werden die Daten eines Messtages von einem ROVER genutzt, um das Nominalverhalten zu bestimmen, so können auch hier erhöhte Standardabweichungen des SNR im Zeit- und Satellitenbezug detektiert werden. Ob diese Methodik hier ein vergleichbares Detektionspotenzial hat wie im Fall der Referenzstation, ist durch die generell reduzierte Datenbasis eine offene Frage. Erhöhte SNR-Standardabweichungen bei niedrigen Elevationswinkeln, die nicht bei allen Empfängern gleichermaßen detektiert wurden, können auch eine Folge der Datenbasisproblematik sein und werden im Folgenden weiter beachtet.

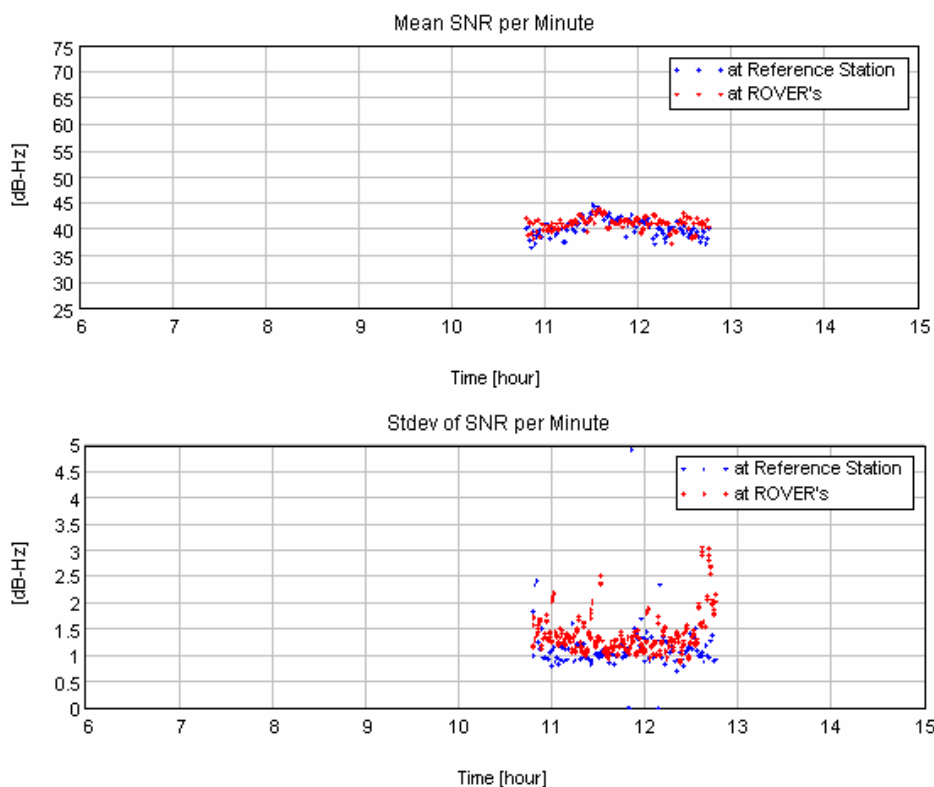


Fig. 5-22 SNR und seine Standardabweichung gemessen an der Referenzstation und an den ROVER(n) am 31.01.2007 (PRN 8)

Detektierte Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR sind in Fig. 5-23 für den 30.01.2007 dargestellt. GGEG und GNSS besitzen ein vergleichbares Verhalten. Deutliche Unterschiede werden jedoch an den GPS-Satelliten 3, 21 und 22 insbesondere auch zum GRTK-Empfänger beobachtet.

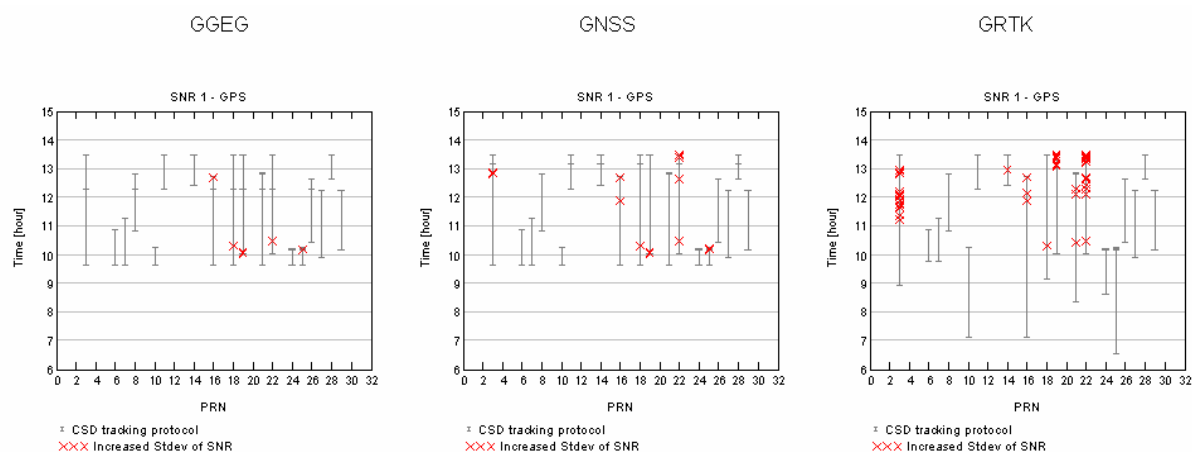


Fig. 5-23 Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 30.01.2007)

Wenn man sich jedoch die Detaildarstellung der Zeitverläufe vom SNR, Mehrwegefehler und vom Phasenrauschen betrachtet (siehe GGEG und GRTK für PRN 3 in Fig. 5-24 und Fig. 5-25), so zeigt sich, dass jedoch keine deutlichen Unterschiede und in keinem dargestellten Wert Ausreißer erkennbar sind. Das belegt die Überempfindlichkeit der Detektionsmethodik.

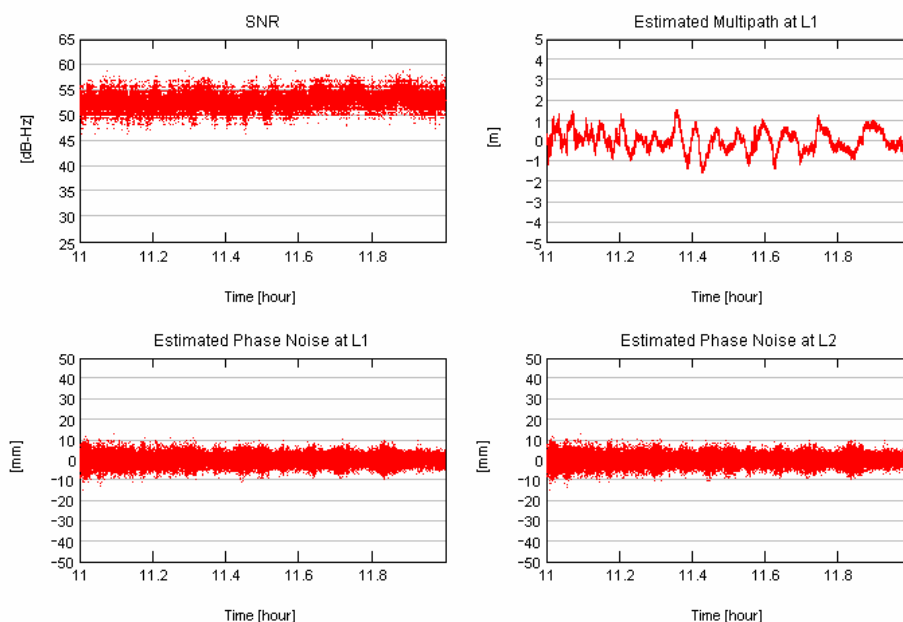


Fig. 5-24 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 3, GGEG, 30.01.2007)

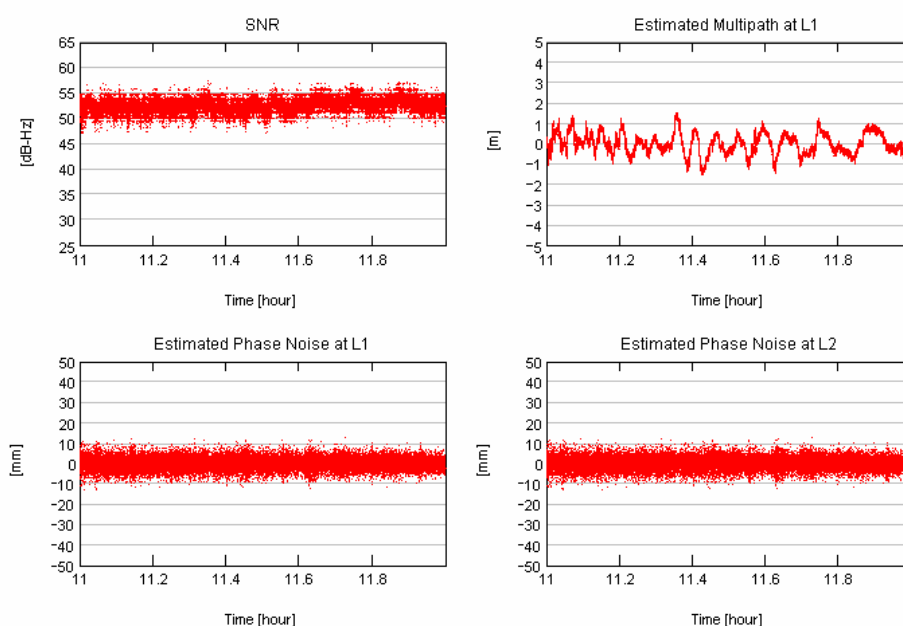


Fig. 5-25 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 3, GRTK, 30.01.2007)

Die Ergebnisse beim PRN 22 (Fig. 5-26 und Fig. 5-27) sind ähnlich interpretierbar.

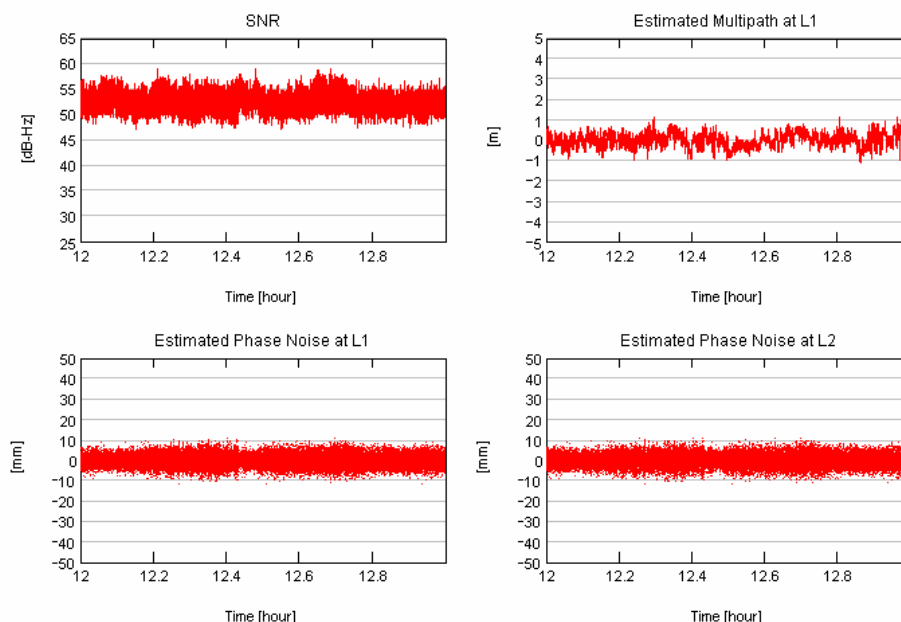


Fig. 5-26 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 22, GGEG, 30.01.2007)

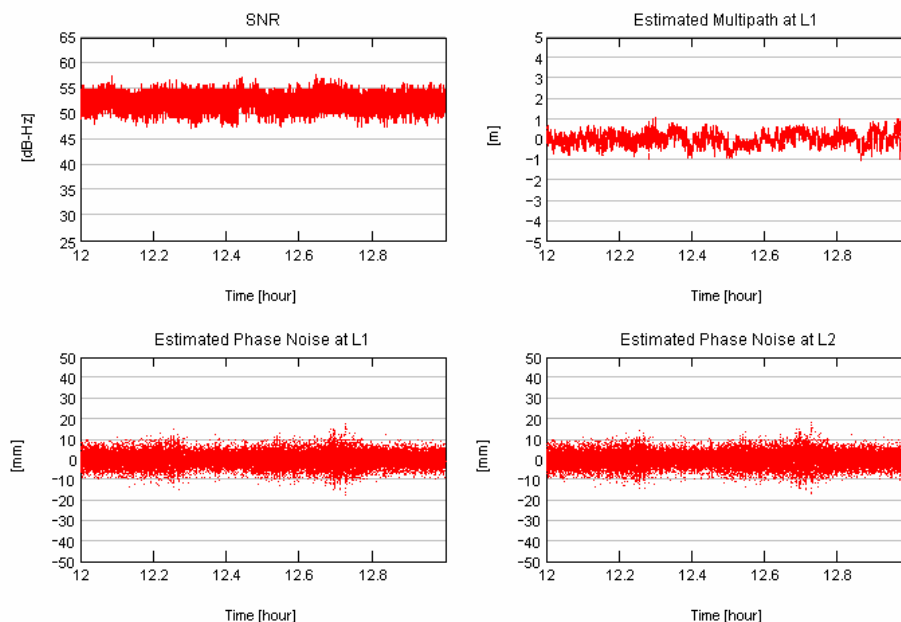


Fig. 5-27 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 22, GRTK, 30.01.2007)

Es handelt sich also in beiden Fällen um ein Schwellwertproblem, das sich aus der Überlagerung folgender Effekte ergibt:

- Die Datenbasis pro Empfänger ist mit einem Messzeitraum von 3,5 h sehr klein, wobei beim GRTK durch die geringere Samplingfrequenz eine zusätzliche Halbierung auftritt.

- In Folge der reduzierten Datenbasis ist mit größeren Abweichungen zwischen den empfangerspezifischen Nominalverhalten zu rechnen, die auch den empfangerspezifischen Schwellwert zur Detektion erhöhter SNR-Standardabweichungen verschiebt.

Die beobachteten Unterschiede sind folglich eher den Grenzen der eingesetzten Methodik bei geringer Datenbasis zuzuordnen.

Zeitpunkte, an denen eine erhöhte Standardabweichung des SNR detektiert wurde, sind in Fig. 5-28, Fig. 5-30 und Fig. 5-34 für die Folgetage dargestellt. Die Verbesserung der Datenbasis auf bis zu 8 Stunden lässt auf eine Stabilisierung des Detektionsverfahrens hoffen.

Hier werden Zeitpunkte an allen ROVER(n) auch bei höheren Elevationswinkeln detektiert, für die eine erhöhte Standardabweichung des SNR besteht.

Interessante Beispiele sind z.B.

- 31.01.2007 zwischen 09:00 und 10:00 am PRN 7, 16, 18 und 21
- 01.02.2007 zwischen 07:00 und 08:00 am PRN 23
- 01.02.2007 zwischen 12:00 und 13:00 am PRN 3, 18 und 22
- 02.02.2007 zwischen 07:00 und 08:00 am PRN 5
- 02.02.2007 zwischen 09:00 und 12:00 am PRN 16, 18, 21 und 22

Die Zeitpunkte vom 31.01.2007 fallen in den Zeitraum der Ostseepassage, bei der das Phasenrauschen dominant durch den extrem erhöhten Modellierungsfehler in Folge des Wellengangs bei Windstärke 8 bestimmt ist. Eine Bewertung des Phasenrauschens ist folglich nicht angebracht. Beim PRN 7, 18 und 21 liegt eine zeitliche Synchronisation vor, d.h. die erhöhte SNR-Standardabweichung wird 9:31 UT beobachtet und dauert knapp 40 Sekunden.

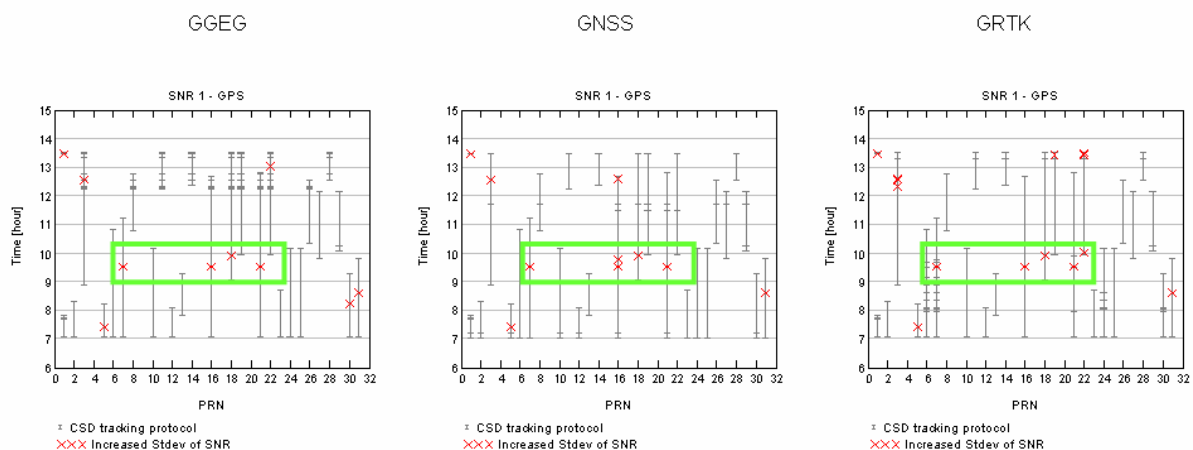


Fig. 5-28 Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 31.01.2007)

Bei allen drei Satelliten ist zu beobachten, dass während dieser Zeit plausible SNR-Werte und etwa 10 dB-Hz niedrigere abwechselnd zur Verfügung gestellt werden (siehe Fig. 5-29 als Beispiel für alle 3 Satelliten). Ob dieser Effekt sich aus einer möglicherweise fehlerhaften Satellitenzuordnung bei der Datenausgabe handelt, kann aus den analysierten Daten weder abgeleitet noch behauptet werden. Fehlende Variationen im geschätzten Mehrwegefehler machen es darüber hinaus unmöglich, diesen Effekt in Bezug zu Signalstörungen zu setzen.

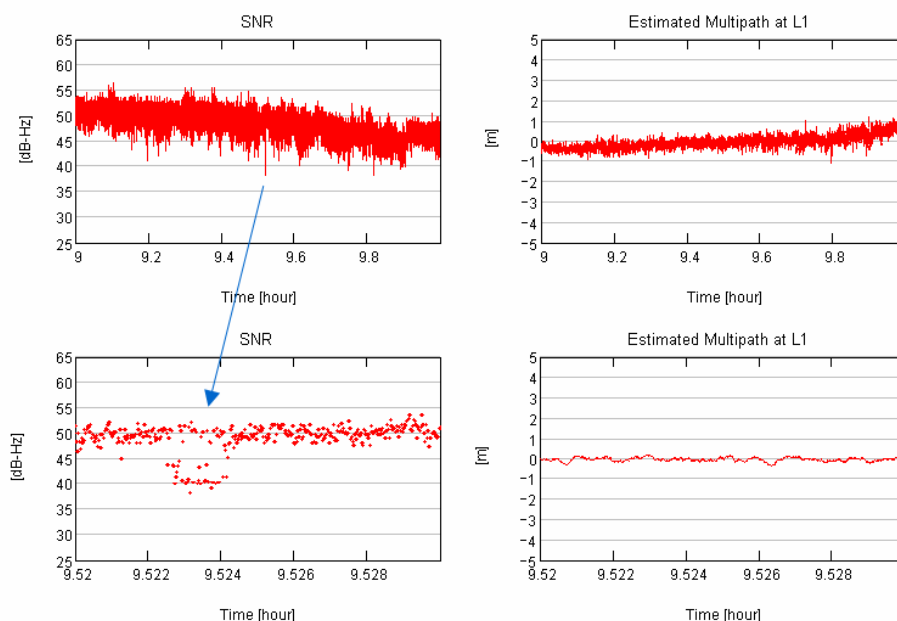


Fig. 5-29 Momentanwert des SNR sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 7, GNSS, 31.01.2007)

Dass dieses Phänomen bzgl. SNR-Verhalten kein Einzelfall ist, zeigt sich am 01.02.2007, bei dem sich dieser Effekt im Abstand weniger Minuten dreimal auf mehreren Satelliten wiederholt. Auch in dieser Stunde befand sich das Forschungsschiff auf der Ostsee, so dass erhöhten Phasenrauschwerte nicht verwunderlich sind und deshalb nicht zur Interpretation hinzugezogen werden.

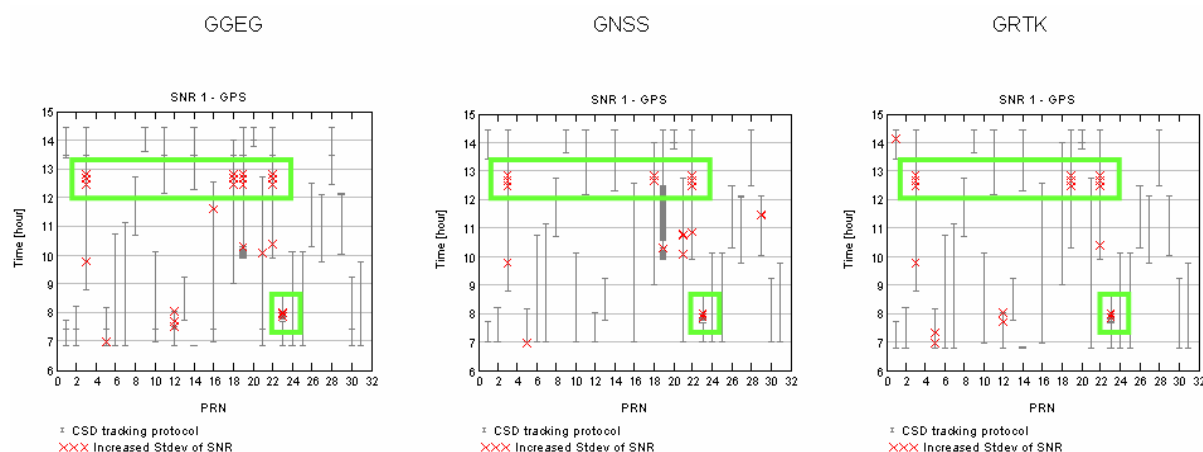


Fig. 5-30 Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 01.02.2007)

Betroffenen Satelliten sind PRN 3 (Fig. 5-31), PRN 18 (Fig. 5-32) und 22. Interessant ist, dass beim PRN 3 und 22 Mehrwegeeffekte erkennbar sind, jedoch nicht beim PRN 18. Es muss darüber hinaus festgestellt werden, dass die erhöhten Schwankungen der Mehrwegefehler zeitlich nicht mit dem SNR-Abfall korreliert sind.

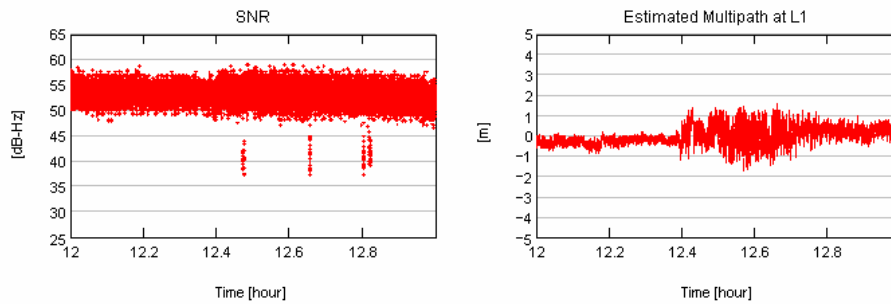


Fig. 5-31 Momentanwert des SNR sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 3, GNSS, 01.02.2007)

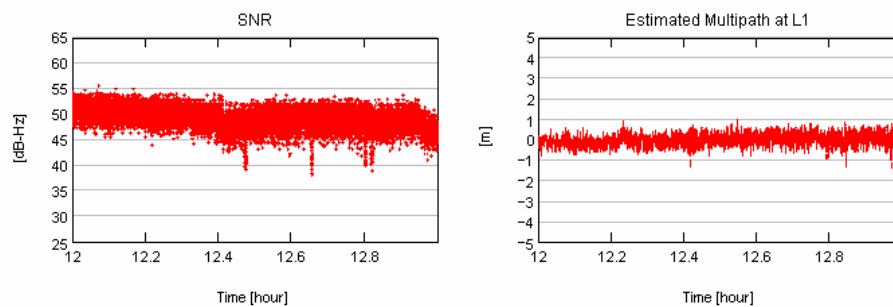


Fig. 5-32 Momentanwert des SNR sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 18, GNSS, 01.02.2007)

Ein weiterer Sonderfall (Fig. 5-33) wurde am PRN 23 am 01.02.2007 detektiert, bei dem rein aus der Dauer des Satellitendurchgangs der Signalempfang bei niedrigen Elevationswinkeln stattgefunden haben muss.

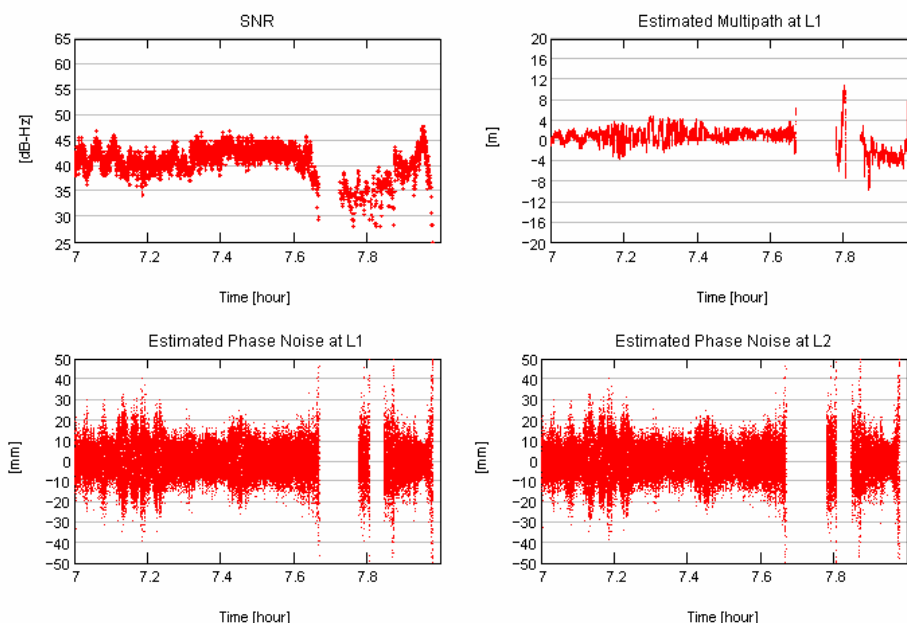


Fig. 5-33 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 23, GNSS, 01.02.2007)

Erhöhte Standardabweichungen des SNR werden erst deutlich nach 7:30 UT ausgewiesen. Es ist jedoch bereits vorher eine erhöhte Variation im SNR, im Mehrwegefehler sowie im Phasenrauschen erkennbar. Gegen 7:40 Uhr werden kurzzeitig überhaupt keine Daten bereitgestellt. Nach der Reakquisition des Signals liegt das SNR um 35 dB-Hz und streut um

bis zu 5 dB-Hz. Das Phasenrauschen ist deutlich erhöht und der Mehrwegefehler erreicht Werte von bis zu 10 Metern.

Bei den am 02.02.2007 detektierten Zeitpunkten mit erhöhter Standardabweichung des SNR ist festzustellen, dass sie sich ähnlich wie andere, bereits im Detail dargestellte Satelliten verhalten.

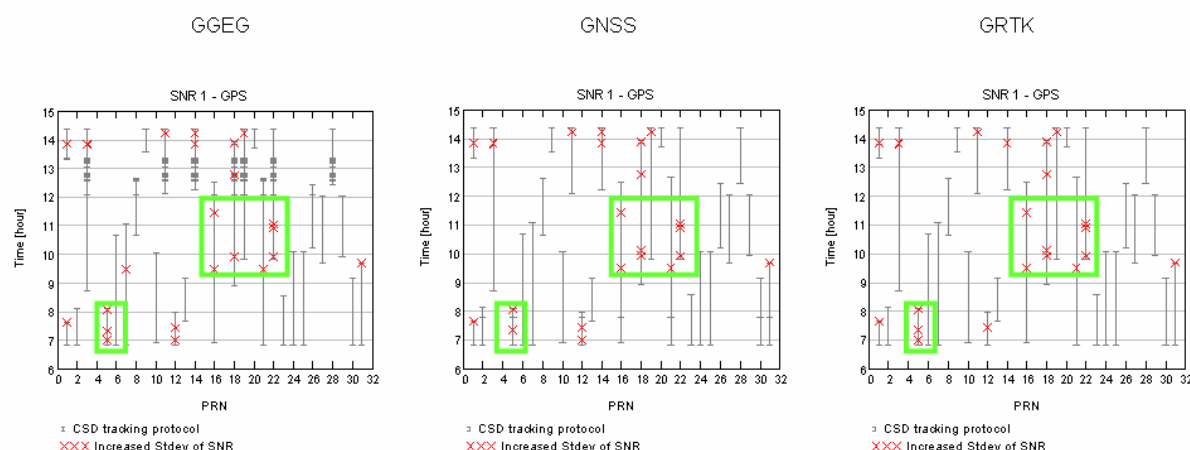


Fig. 5-34 Zeitpunkte mit erhöhter Standardabweichung des SNR pro Minute in Bezug zum Trackingprotokoll des CSD (ROVER, 02.02.2007)

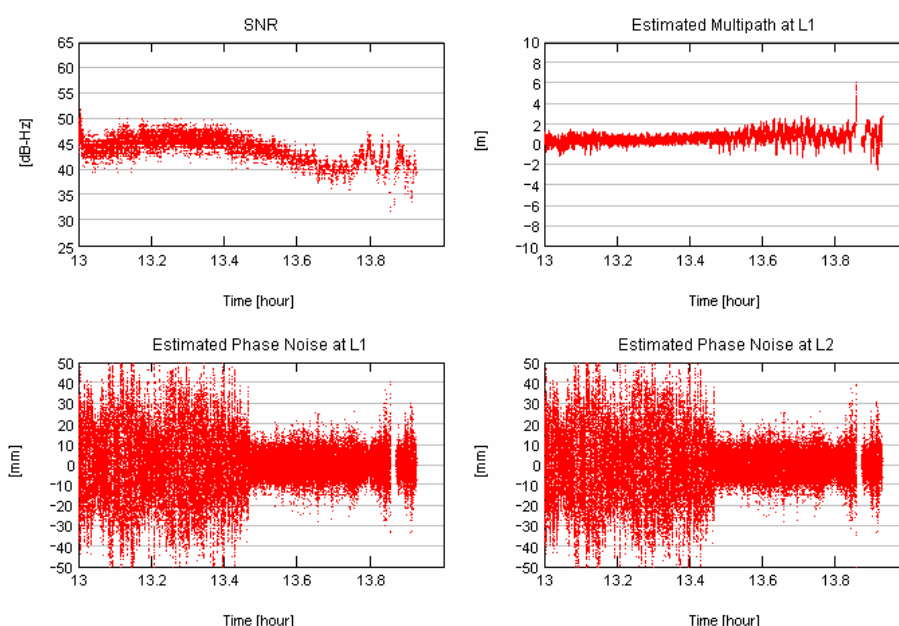


Fig. 5-35 Momentanwert des SNR und zugeordnet Phasenrauschen auf L1 und L2 sowie geschätzter Mehrwegefehler auf L1 (PRN 18, GNSS, 01.02.2007)

Beim PRN 5 treten diese Zeitpunkte bei niedrigen Elevationswinkeln gepaart mit leicht erhöhten Streuungen des Mehrwegefehlers und des Phasenrauschens auf. Der Effekt kurz vor 14 Uhr auf den Signalen der Satelliten 1, 3, 14 und 18 tritt wieder zeitsynchron auf. Erhöhte Mehrwegefehler sind beim PRN 1 nicht zu beobachten, während beim PRN 3 und 14 von einer leichten Erhöhung gesprochen werden kann.

Beim PRN 18 (Fig. 5-35) jedoch, der kurz danach nicht mehr sichtbar ist, ist dagegen eine deutliche Erhöhung des Mehrwegefehlers und des Phasenrauschens erkennbar. Dieser folgt dann eine Unterbrechung der Datenbereitstellung und eine kurze Reakquisition bei sehr geringen SNR. Die um 13:40 Uhr erfolgte Reduzierung des Phasenrauschens korreliert mit der Einfahrt des Forschungsschiffes in die Warnow.

SF 13 Das SNR und seine Standardabweichung sind ein Identifikationskriterium für Signalstörungen. Dies konnte sowohl anhand der Daten der Referenzstation als auch der ROVER belegt werden. Es muss aber bemerkt werden, dass nicht jede Erhöhung zwangsläufig mit erhöhtem Phasenrauschen und Mehrwegefehlern korreliert ist.

5.4 Zusammenhang zwischen SNR und Phasenrauschen

Der Zusammenhang zwischen SNR und Phasenrauschen wurde auf der Grundlage der hochratigen Messergebnisse bestimmt, wobei die Methodik dem in Kapitel 10 (Anlage B) beschriebenen Verfahren entspricht, nur dass jetzt das Phasenrauschen in Abhängigkeit vom SNR bestimmt wird. Die für das Phasenrauschen genutzten Wertebereichsvorgaben und Quantifizierung sind im Kapitel 9.3.1 angegeben.

Referenzstation

In Fig. 5-36 ist die Standardabweichung des L1-Phasenrauschens vom SNR S1 sowie des L2-Phasenrauschens vom SNR S2 dargestellt. Zugeordnet ist die Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil angegeben, um eine Interpretation der Ergebnisse auch in Bezug zur Datenbasis zu ermöglichen.

Für das L1-Signal zeigt sich, dass über 35 dB-Hz keine Unterschiede zwischen den Messtagen bestehen. Im Bereich von 35 bis 30 dB-Hz streuen die tagesspezifischen Ergebnisse zunehmend umeinander, während unter 30 dB-Hz gravierende Abweichungen zu beobachten sind. Diese beiden Effekte resultieren aus der Tatsache, dass ab ca. 40 dB-Hz die Anzahl von Datenproben abnimmt und unter 1000 liegt, wenn das SNR selbst unter 32 dB-Hz liegt. Dem zugeordnet ist mit einem Sinken der Qualität des SNR-bezogenen Schätzwertes des Phasenrauschens zu rechnen.

Beim L2-Signal werden im Allgemeinen niedrigere SNR-Werte gemessen, wobei der Wertbereich selbst größer geworden ist. Auch hier ist eine Identität der tagesspezifischen Ergebnisse zu beobachten, wenn das SNR über 15 dB-Hz liegt, also mehrere 1000 Messwerte zur Verfügung stehen. Folglich gilt auch hier, dass der funktionale Zusammenhang zwischen SNR und Phasenrauschen unter 15 dB-Hz als nicht mehr vertrauenswürdig zu beschreiben ist. Ein interessanter Aspekt ist das geringere Anstiegsverhalten der Standardabweichung des L2-Phasenrauschens bei abnehmenden SNR. Gründe dafür sind in der abnehmenden Datenbasis zu suchen, aber auch in der Tatsache, dass L2-Werte bei geringerem SNR und damit mit einem höheren Phasenrauschen überhaupt nicht bereitgestellt werden.

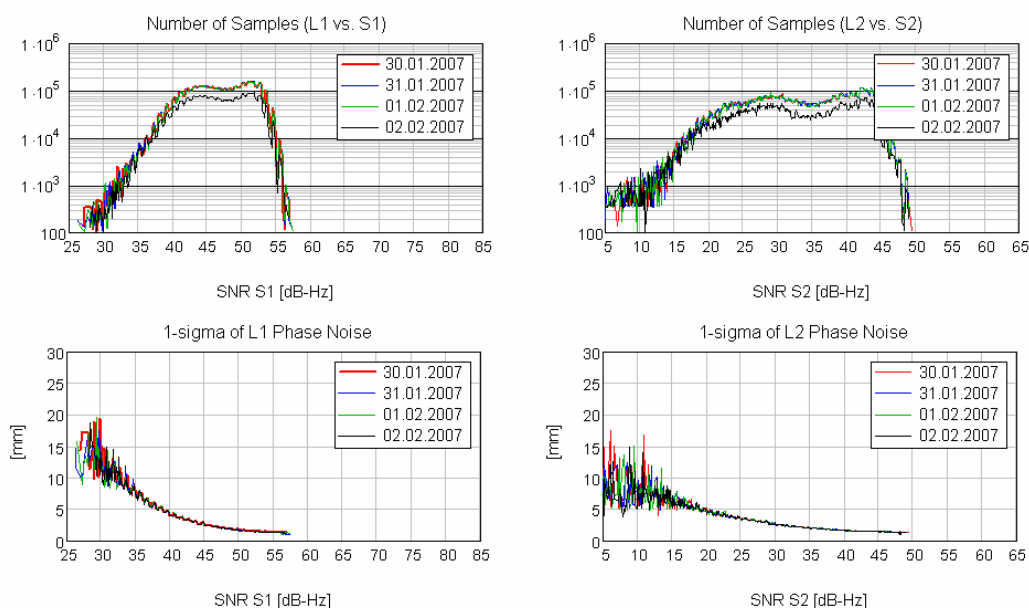


Fig. 5-36 Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an der Referenzstation sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil

Rover

Die Daten am 30.01.2007 (Fig. 5-37) beziehen sich ausschließlich auf Fahrten in Binnengewässern, wobei die Messdauer 3,5 Stunden betrug.

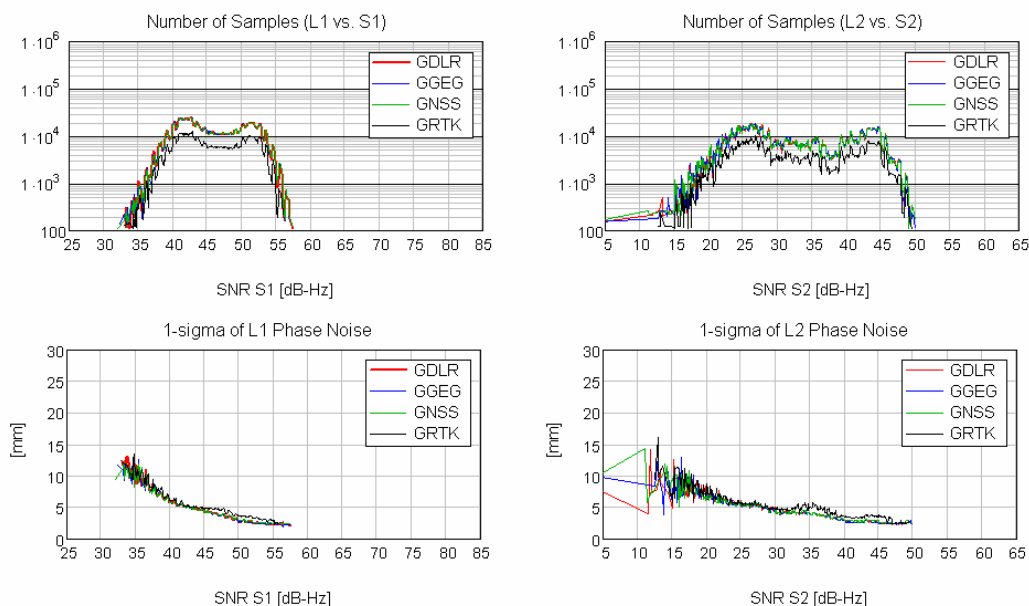


Fig. 5-37 Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 30.01.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil

Die Messwertanzahl bei den ROVER-Empfängern GDLR, GGEG und GNSS liegt unter der der GBAS, wobei beim GRTK sie sich zusätzlich wegen der halben Samplingfrequenz reduziert. Die Standardabweichung des L1- und des L2-Phasenrauschens der ROVER liegt im Mittel ~ 4 mm über dem der Referenzstation, besitzt aber ein vergleichbares Anstiegverhalten. Bei einigen SNR-Werten besitzt der GRTK eine leicht erhöhte Standardabweichung (~ 1mm) gegenüber der der anderen ROVER. Daraus ist ablesbar, dass der Modellierungsfehler bei der CSD-Phasenrauschschätzung hier keine signifikante Bedeutung hat.

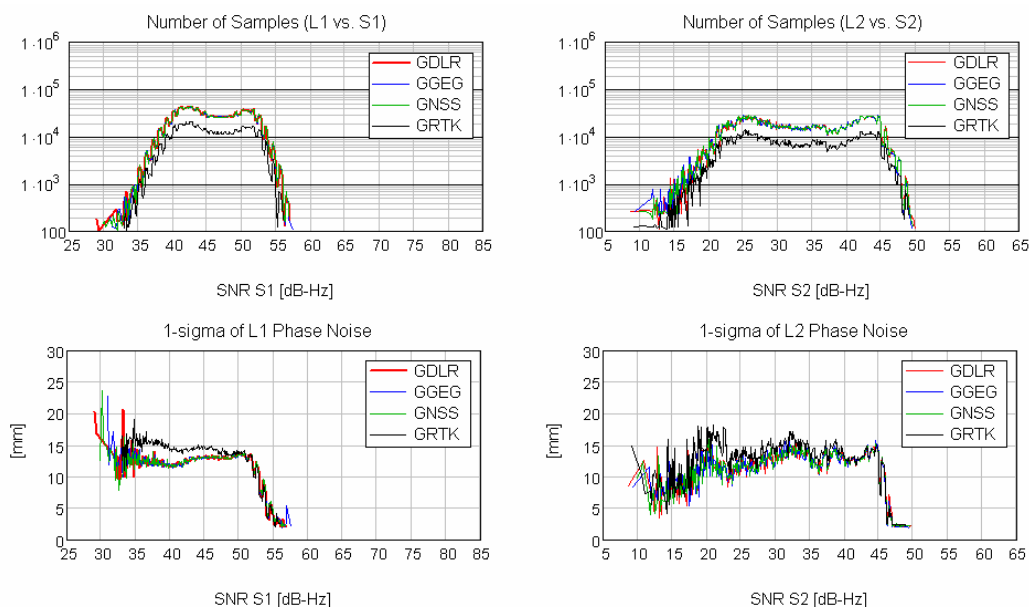


Fig. 5-38 Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 31.01.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil

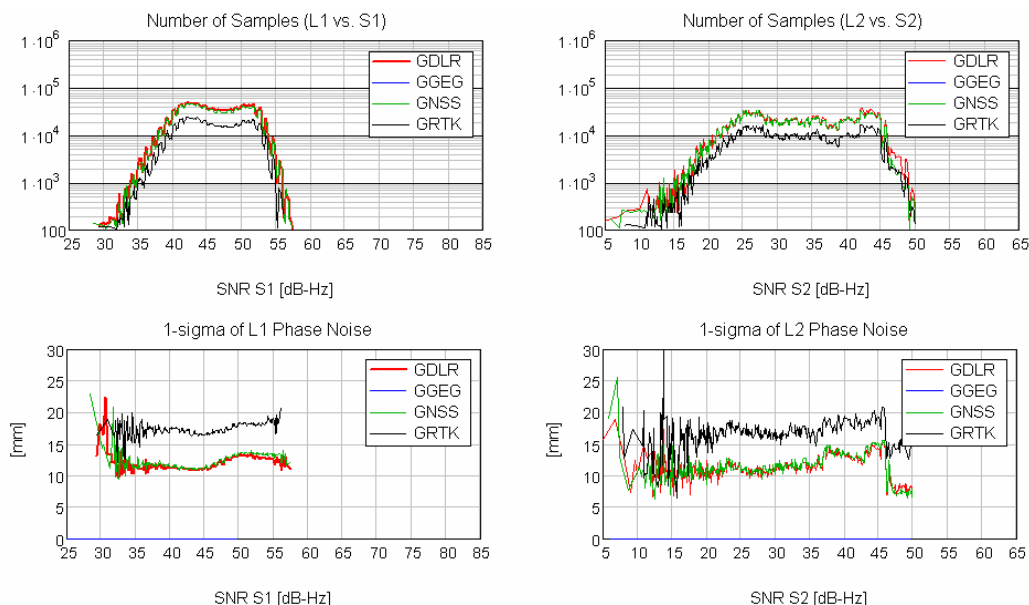


Fig. 5-39 Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 01.02.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil

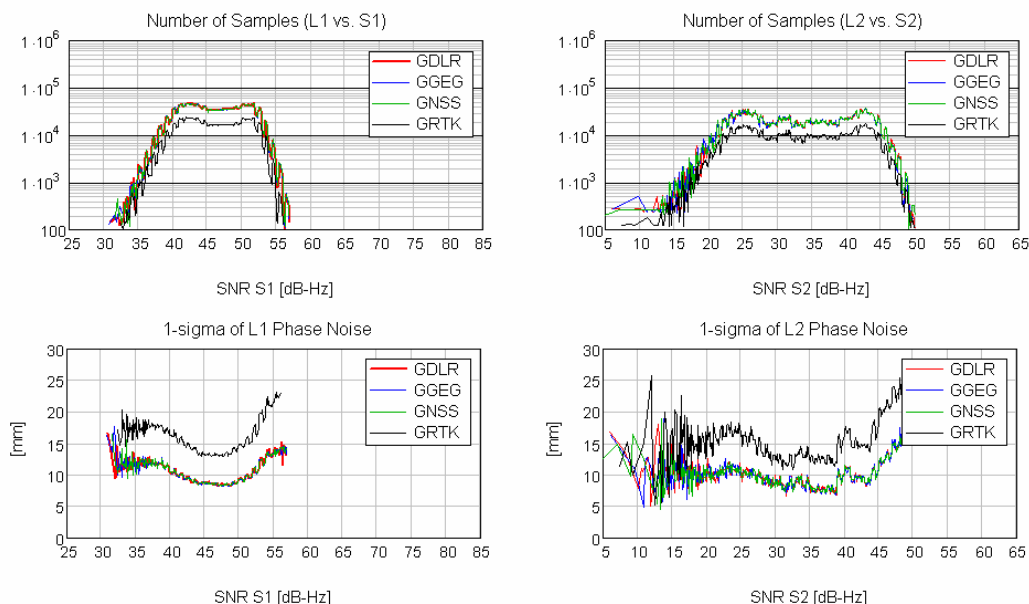


Fig. 5-40 Standardabweichung des Phasenrauschens in Abhängigkeit vom SNR an den ROVER(n) am 02.02.2007 sowie zugeordnete Anzahl von Messwertpaaren pro SNR-Quantil

An den Folgetagen (Fig. 5-38 bis Fig. 5-40) zeigt sich, dass der aus den Messdaten abgeleitete funktionale Zusammenhang zwischen SNR und Standardabweichungen, wie er an der Referenzstation und am 30.01. bei den ROVER(n) beobachtet wurden, nicht reproduzierbar ist.

An diesen Tagen enthalten die Messfahrten Passagen auf der Ostsee, die sich in ihrer Dauer und den Witterungsbedingungen deutlich unterschieden. Dass zu diesen Zeiten eine gravierende Zunahme des geschätzten Phasenrauschens in Folge des Modellierungsfehlers auftrat, wurde bereits nachgewiesen. Er fällt dann so dominant aus, dass die technischen Zusammenhänge zwischen SNR und Phasenrauschen nicht mehr sichtbar sind.

Am 31.01.2007 war die Ostseepassage auf 2 h bei einer Messfahrdauer von 5,5 h begrenzt. Am 01.02. und 02.02. wurden mehr als 70% aller Daten auf der Ostsee gemessen. Die Folge ist eine nahezu SNR-unabhängige Erhöhung der Standardabweichung des geschätzten Phasenrauschens auf bis über 2 cm. Dass die GRTK-Standardabweichung deutlich über denen der anderen ROVER liegt, ist ein weiterer Beweis für den dominanten Modellierungsfehler.

SF 14 Zwischen SNR und Größe des Phasenrauschens besteht ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang, der bei der eingesetzten Methodik zur Bestimmung des Phasenrauschens nur bei statischen Messungen nachweisbar ist.

Für dynamische Rauschschätzungen empfiehlt sich die Erweiterung des CSD auf eine Mehrfrequenzanalyse, um auch in Echtzeit zwischen korrelierten und unkorrelierten Anteilen in den Phasenrauschschätzungen unterscheiden zu können. Dies wird als ein Ansatz betrachtet, um eine fehlerhafte Detektion von Cycle Slips weiter zu reduzieren und die Phasenrauschbewertung weiter zu qualifizieren.

6 Mehrwegeeffekte²⁰

Mehrwegeeffekte werden mit Hilfe des „Carrier Smoothing“-Verfahrens für 5 verschiedene Kombinationen von Range- und Phasenmessungen bestimmt. Der eingesetzte Algorithmus zur Bestimmung der geglätteten Rangemessung und der daraus abgeleiteten Schätzung des Mehrwegefehlers ist in Kapitel 11 (Anlage C) beschrieben. Bei der einfrequenzbasierten Schätzung wurde dieses Verfahren auf die Kombinationen

- C/A-Code basierter Range und L1 Trägerphase (CAmulti)
- P1-Code basierter Range und L1 Trägerphase (P1multi)
- P2-Code basierter Range und L2 Trägerphase (P2multi)

angewendet. Ein kritischer Punkt beim einfrequenzbasierten „Carrier Smoothing“ ist der Einfluss des ionosphärischen Laufzeitfehlers, der zu einem driftenden Biastern im Schätzwert führt. Dieser kann umgangen werden, wenn aus P1 und P2 sowie aus L1 und L2 vorab der absolute und relative ionosphärische Laufzeitfehler bestimmt wird und zur Korrektur des Ranges bzw. der Phase verwendet wird. Diese zweifrequenzbasierten Schätzungen werden mit folgenden Kombinationen

- Ionosphärenkorrigierter P1-Code basierter Range und ionosphärenkorrigierte L1 Trägerphase (cPmulti)
- Ionosphärenkorrigierter P2-Code basierter Range und ionosphärenkorrigierte L2 Trägerphase (cPmulti)

ausgeführt, wobei diese bei korrekter Implementierung identisch sind.

6.1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der geschätzten Mehrwegefehler²¹

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den Codes wird stationsbezogen, also unter Einbeziehung aller satellitenspezifischen Daten ermittelt. Ergänzend wird die Standardabweichung pro Satellit angegeben, um stärker betroffene Satelliten zu identifizieren.

Referenzstation

Die tageweisen Ergebnisse der Referenzstation sind in Fig. 6-1 bis Fig. 6-3 und Fig. 6-6 dargestellt.

Bei den stationsbezogenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (WDF) ist an allen Tagen ein nahezu ähnliches Verhalten zu beobachten. Bei der WDF des Mehrwegefehlers auf dem C/A-Code besitzen die Kurven ein geringeres Maxima und einen flacheren Verlauf im Vergleich zu den Kurven der Mehrwegefehler auf den P-Codes. Das offeriert die Aussage, dass C/A-Code basierte Rangemessungen stärker mit Mehrwegefehler behaftet sind, als P-Code basierte Rangemessungen. Dieser Effekt ist technisch erklärbar aus der höheren Chiprate des P-Codes und der Codelänge. Es muss aber auch beachtet werden, dass bei der Neuak-

²⁰ Für den 01.02.2007 sind derzeit noch keine Ergebnisse des GGEG-Empfängers berücksichtigt.

²¹ Die Grafiken wurden auf der Grundlage der Ergebnisfiles CAmulti.dat, P1multi.dat, P2.multidat und cPmulti.dat mittels Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion(ROVER-Vergleich).xcmd dargestellt. Mehrwegefehler im Zeitbezug beruhen auf den aufgezeichneten Mehrwegefehlern der Files IncreasedMultipath_PRN.dat, die mit SHOW_IncreasedMulti.xcmd visualisiert wurden.

quisition eines Signals P-Code basierte Rangemessungen im Vergleich zu C/A-Code basierten Rangemessungen zeitverzögert zur Verfügung stehen. Auch die Bereitstellung der P2-Code besitzt gegenüber der der P1-Code-Daten eine weitere Zeitverzögerung. Die damit verbundene Reduktion der Datenbasis betrifft vorwiegend Epochen, wo erhöhte Mehrwegefehler erwartet werden. Ob dies alleinige Ursache für das leicht erhöhte Maximum der WDF des P2-zugeordneten Mehrwegefehlers ist, ist eine offene Frage.

Beim Vergleich der einfrequenz- und zweifrequenzbasierten WDF des Mehrwegefehlers für den P1-Code sowie für den P2-Code ist zu erkennen, dass ihre Kurvenverläufe sich kaum unterscheiden. Dies ist ein Indiz dafür, dass während der Messkampagne ionosphärisch bedingte, driftende Biasterms in den Mehrwegefehlerschätzungen eine vernachlässigbare Größenordnung besitzen.

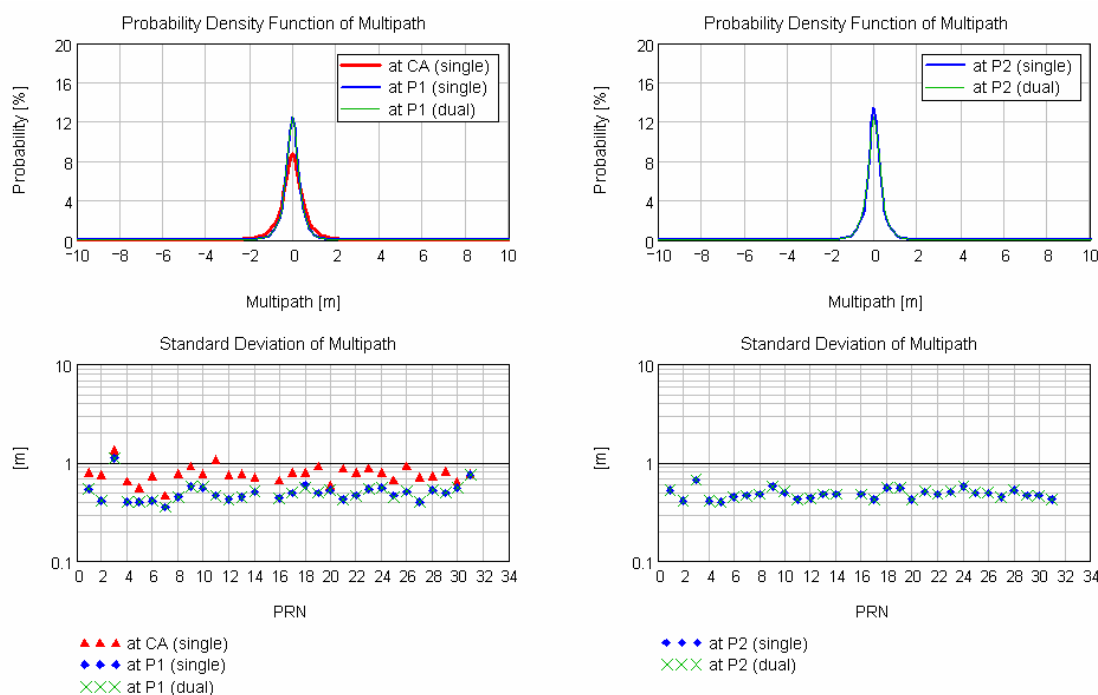


Fig. 6-1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (30.01.2007)

Ein direkter Vergleich der satellitenspezifischen Standardabweichungen des Mehrwegefehlers ist nur für den Zeitraum 30.01. bis 01.02. möglich, da am 02.02.2007 nur eine reduzierte Datenbasis durch den verkürzten Messzeitraum zur Verfügung stand. An diesen Tagen ist festzustellen, dass die Standardabweichung des Mehrwegefehlers bei fast allen Satelliten unter 1 m lag. Ausnahmen sind

- 30.01.2007: PRN 3 und 11
- 31.01.2007: PRN 3 und 11

Am 01.02. gehören die Standardabweichungen für PRN 3 und 11 zwar auch zu den höheren Werten, überschreiten aber nicht die 1 m Marke. Es muss bemerkt werden, dass diese Erhöhungen vorrangig dem für den C/A-Code bestimmten Mehrwegefehler zugeordnet sind.

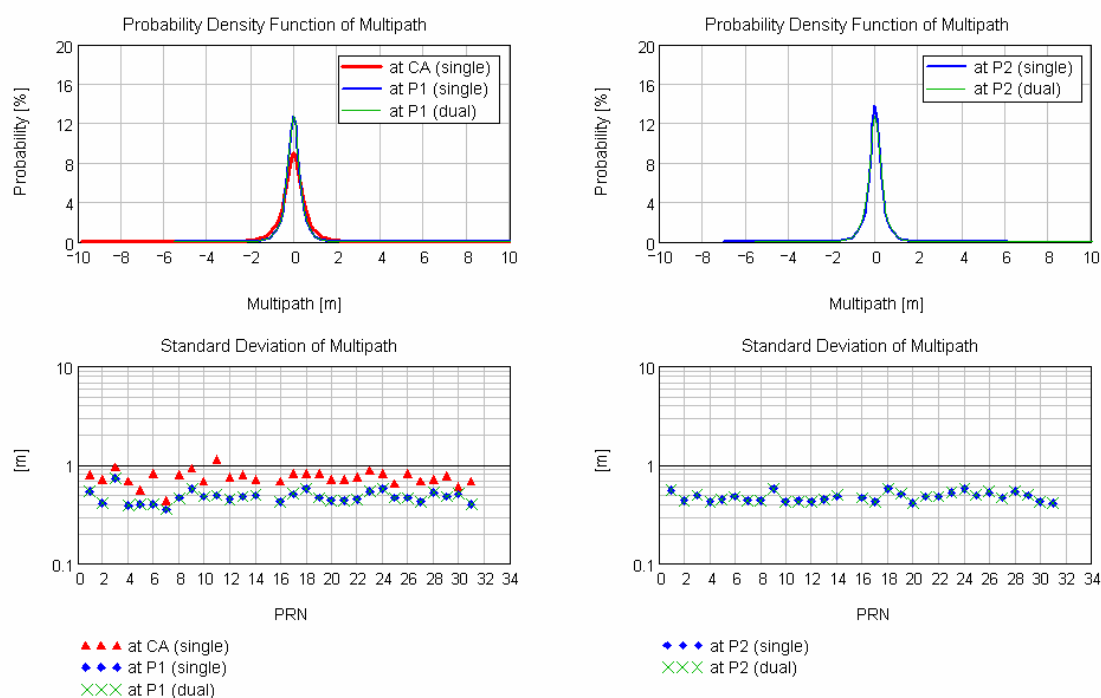


Fig. 6-2 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (31.01.2007)

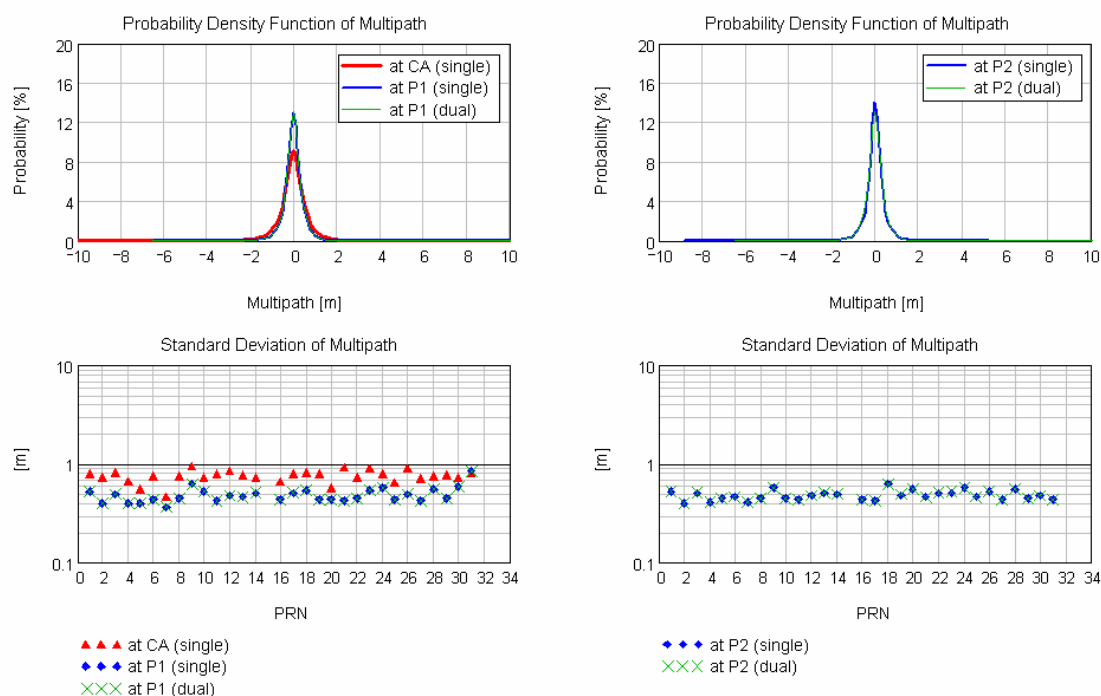


Fig. 6-3 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (01.02.2007)

Dass der PRN 11 an 2 Tagen mit einer erhöhten Standardabweichung ausgewiesen ist, ist ein Indiz für einen umgebungsbedingten Mehrwegeffekt, der im gleichen Empfangsszenario auftritt. Um dies zu prüfen werden die Mehrwegefehler auf der C/A-Rangemessung in ihrer Zeitabhängigkeit betrachtet.

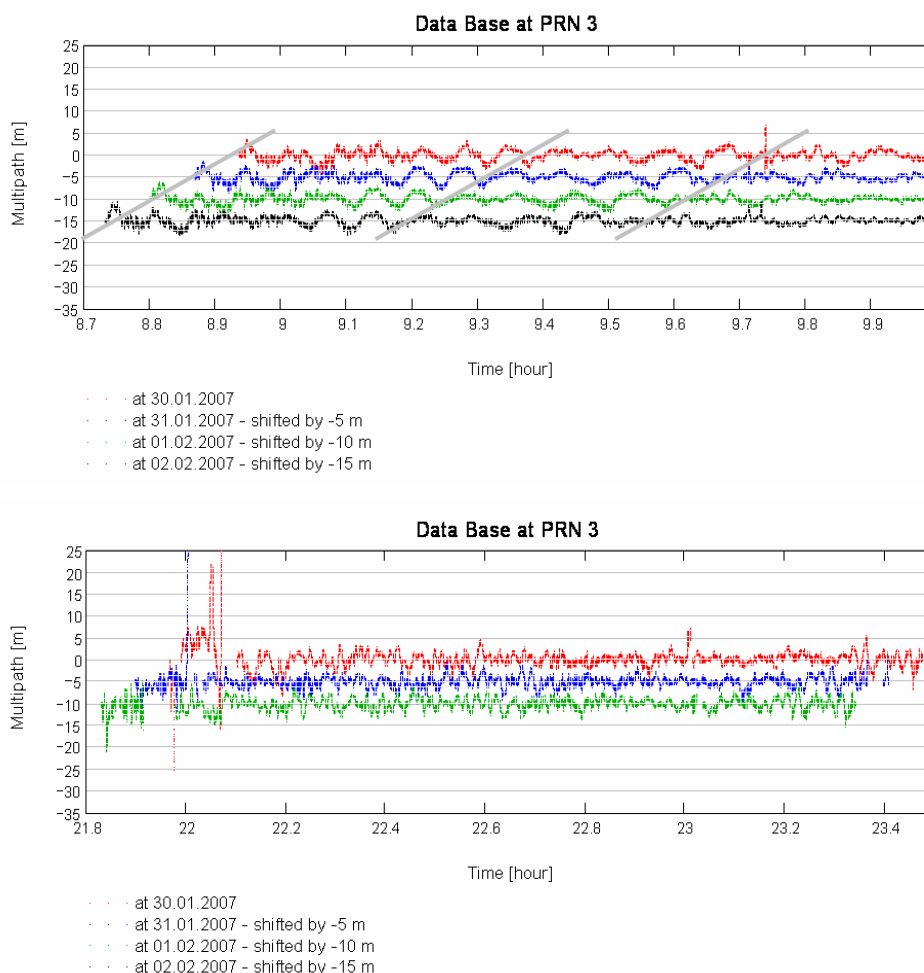


Fig. 6-4 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 3) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)

Die grauen Linien in Fig. 6-4 kennzeichnen den Zeitversatz des Satellitendurchganges vom PRN 3 an Folgetagen. Es ist eine Wiederholbarkeit des Mehrwegefehlers im gleichen geometrischen Szenario erkennbar. Gegen 9:42 Uhr ist eine weitere Erhöhung am 30.01, 31.01. und 02.02. 2007 zu beobachten, die einerseits eher zeitlich korreliert auftritt und bei der die Signatur stärker variiert. Ob dieser Effekt aus dem um diese Zeit ablaufenden Anlegeprozess der Scandline-Fähre resultiert, muss durch Georeferenzierung nachgewiesen werden. Der deutlich erhöhte Mehrwegefehler in den Abendstunden tritt während des Satellitenaufgangs (ab 5° Elevation) bei niedrigen Elevationswinkeln auf. Um 23:00 Uhr besitzen nur die Daten vom 30.10.2007 einen erhöhten Mehrwegefehler. Zeitlich zugeordnet ist am 01.02. noch eine Unterbrechung der Datenbereitstellung erkennbar. Ob dieser Effekt aus dem um diese Zeit ablaufenden Anlegeprozess der TT-Line-Fähre resultiert, muss durch Georeferenzierung nachgewiesen werden.

Beim PRN 11 (Fig. 6-5) erfolgt in den Morgenstunden ein Satellitendurchgang unter sehr niedrigen Elevationswinkeln. Variationen vom mehr als 5 m sind erkennbar und sind in ihrem Verlauf den gleichen geometrischen Empfangsbedingungen zuzuordnen. Beim Satellitenuntergang in den Abendstunden treten erhöhte Werte während des Satellitenuntergangs auf,

die Unterschiede im zeitlichen Auftreten und in ihrer Signatur aufweisen. Durch Georeferenzierung ist zu untersuchen, ob es einen ursächlichen Zusammenhang mit dem um diese Zeit stattfindenden An- und Ablegeprozess der Scandline-Fähre gibt.

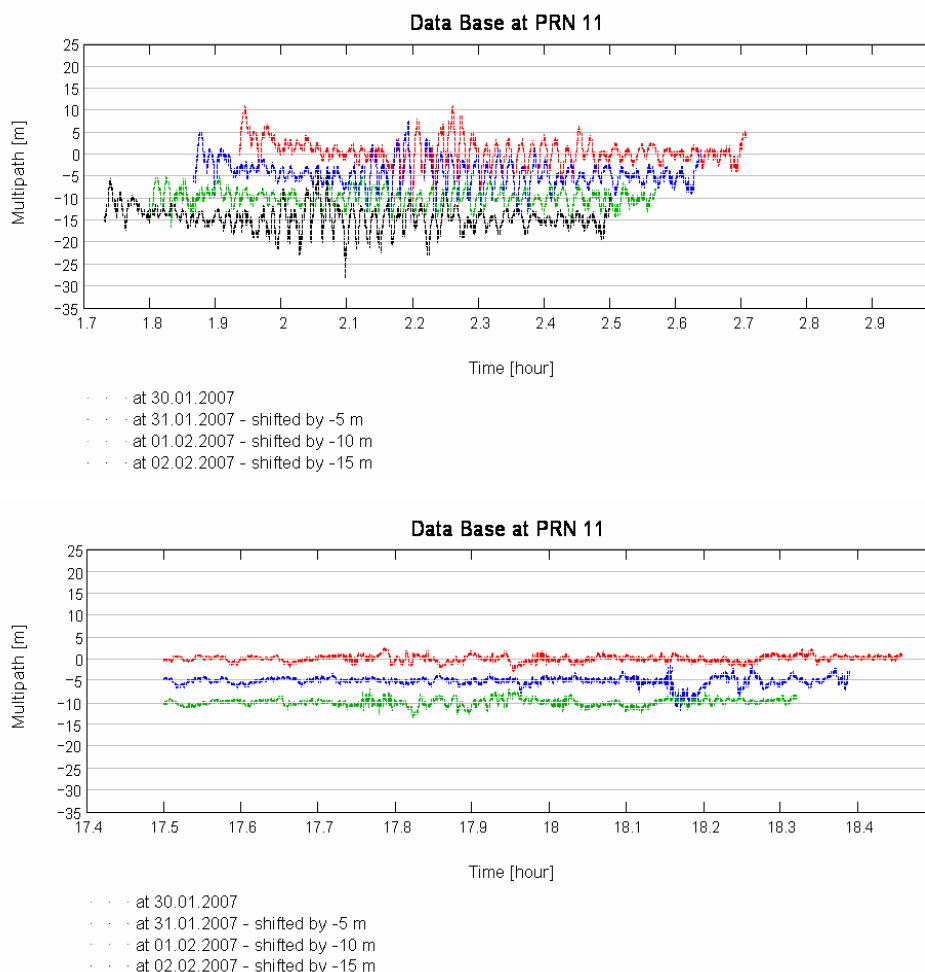


Fig. 6-5 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 11) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)

Am 02.02.2007 ist eine erhöhte Variation der satellitenspezifischen Standardabweichungen des Mehrwegefehlers (Fig. 6-6) erkennbar. Diese ist begründet in der auf ~60% reduzierten Datenbasis. Durch den teilweisen Wegfall von Satellitendurchgängen unter niedrigen oder auch unter hohen Elevationswinkeln verbessern bzw. verschlechtern sich die satellitenspezifischen Ergebnisse. Dadurch wird der Situationsbezug stärker sichtbar.

Hier zeigt sich, dass die Ergebnisse für PRN 11, 13, 20 und 23 weitere Beispiele sein sollten, bei denen erhöhte Mehrwegefehler auftraten. Beim PRN 11 ist am 02.02.2007 nur der Satellitendurchgang unter niedrigen Elevationswinkeln (siehe Fig. 6-5) enthalten und damit die Standardabweichung des Mehrwegefehlers auf der C/A-Rangemessung erhöht.

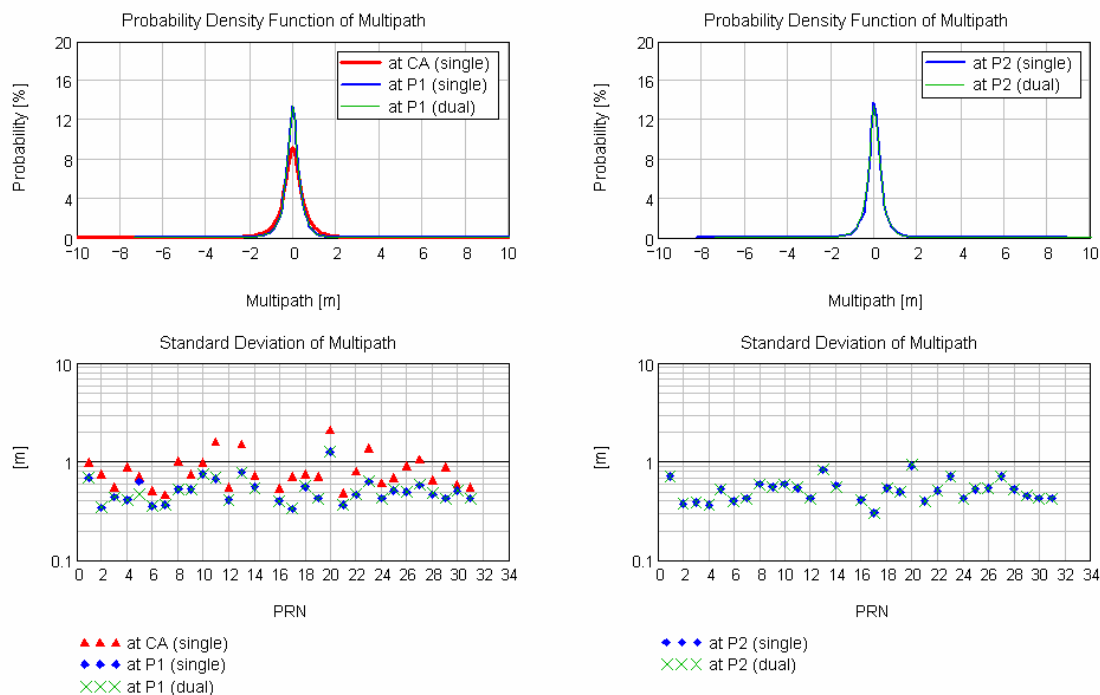


Fig. 6-6 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an der Referenzstation (02.02.2007)

Gleiches gilt für den PRN 13 (siehe Fig. 6-7):

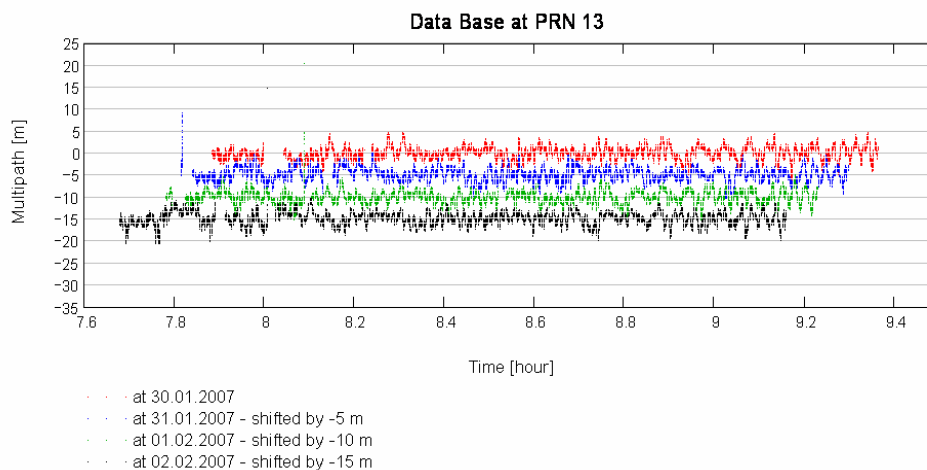


Fig. 6-7 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 13) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)

Der PRN 20 (Fig. 6-8) wird in den Morgenstunden nur einige Minuten empfangen, was ein Zeichen dafür ist, dass der gesamte Satellitendurchgang unter 10° Elevation ablief. Der Satellitenaufgang in den Nachmittagsstunden beginnt erst kurz vor 14 Uhr, so dass die für den 02.02.2007 für den Satelliten bestimmte Standardabweichung des Mehrwegefehlers als eine Beschreibung des Extremfalls interpretiert werden muss.

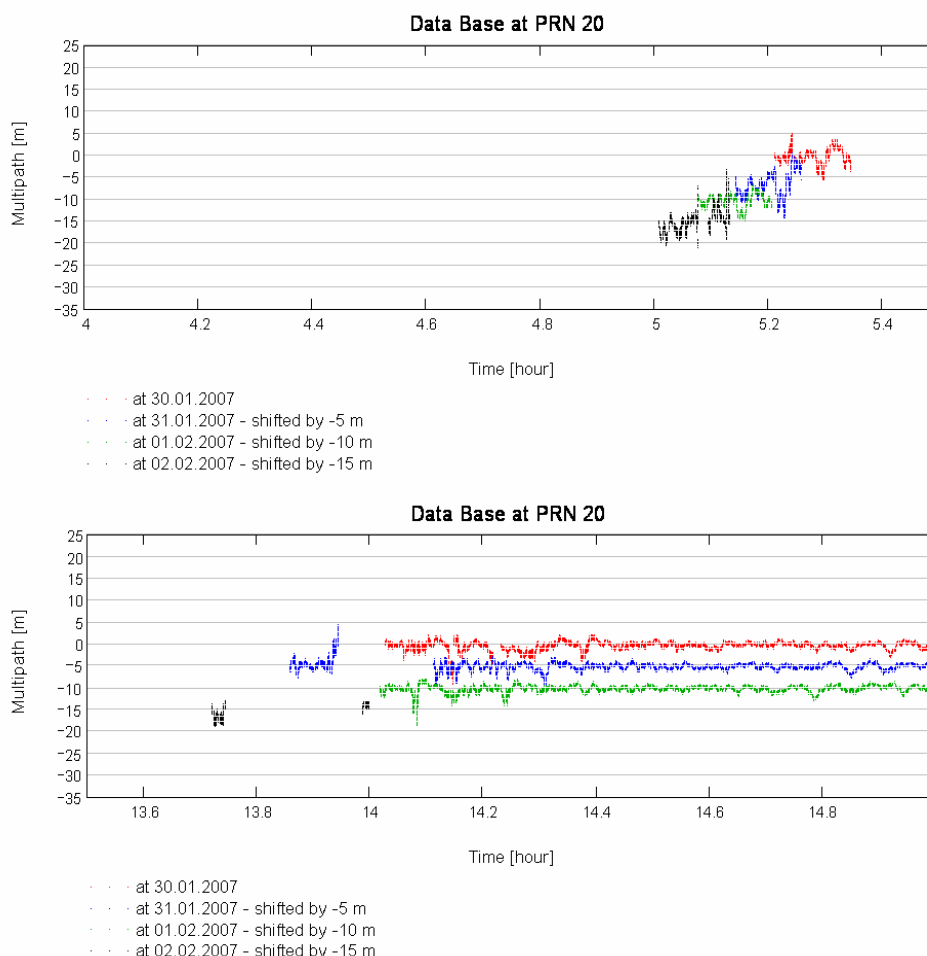


Fig. 6-8 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 20) für die C/A-Rangemessungen (Referenzstation)

Auch für den PRN 23 gilt, dass der Satellitendurchgang unter niedrigeren Elevationswinkeln in den Morgenstunden abläuft. Auf seine Darstellung wird hier verzichtet.

SF 15

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen belegen, dass Mehrwegefehler in den Rangemessungen vorrangig in einem Wertebereich von $\{-2\text{m}; +2\text{m}\}$ liegen. Höhere Mehrwegefehler sind die Ausnahme, treten vorrangig bei niedrigen Elevationswinkeln auf und besitzen oft einen vergleichbaren geometrischen Bezug. Mittels Georeferenzierung empfiehlt sich für die Referenzstation die Darstellung der Standardabweichung des Mehrwegefehlers in Abhängigkeit von Elevations- und Azimutwinkeln.

Satelliten mit erhöhten Standardabweichungen des geschätzten Mehrwegefehlers (Tageswerte) sind PRN 3 und 11. Am 02.02. sind es andere Satelliten, da hier stärker die Datenbasis und die damit verbundenen Empfangsbedingungen zum Tragen kommen.

Rover

Die Analyse der Mehrwegefehler bei den auf dem Messschiff betriebenen Empfängern erfolgt wieder tageweise, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Um den Darstellungsumfang zu reduzieren, wird sich auf den Mehrwegefehler der C/A-Code und P1-Code basierten Rangemessungen konzentriert.

Am 30.01.2007 besitzen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der ROVER (Fig. 6-9) einen ähnlichen Kurvenverlauf. Das entspricht den Erwartungen, da alle Empfänger an einer Antenne betrieben wurden und dadurch Mehrwegeeffekte sich gleich stark in den Messwerten abbilden sollten. Wenn man jedoch die pro Satellit bestimmten Standardabweichungen des Mehrwegefehlers betrachtet, so sind insbesondere beim PRN 25 kleine Unterschiede bei C/A-Range bezogenen Ergebnissen zu erkennen.

Alle bestimmten Mehrwegefehler liegen generell im Bereich zwischen -5 m und +5 m.

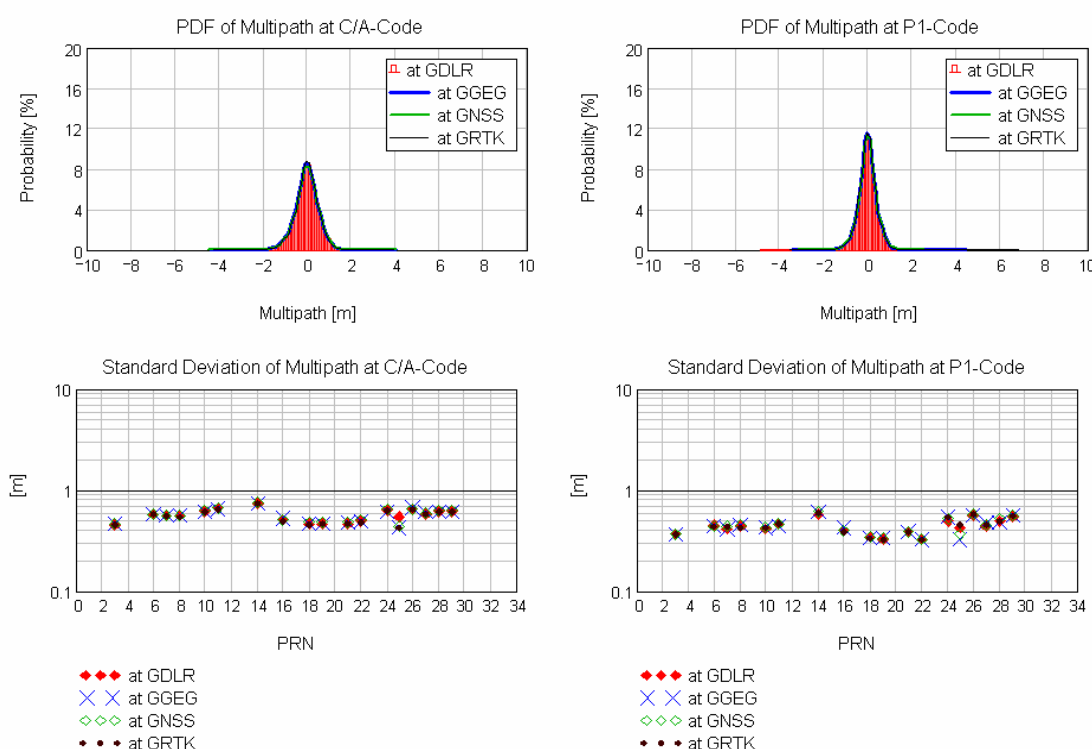


Fig. 6-9 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (30.01.2007)

Betrachtet man die Schätzwerte für den C/A-Range basierten Mehrwegefehler vom PRN 25 in ihrem Zeitverlauf (Fig. 6-10), so kann festgestellt werden, dass bei jedem Empfänger der Zeitverlauf vergleichbaren Schwankungen und Größenordnungen unterliegt. Repräsentative Beispiele sind pink umrandet. Unterschiede sind vor bzw. nach einer Unterbrechung der Datenbereitstellung bezüglich der Datenverfügbarkeit und damit eingehender Messwerte festzustellen.

In den Zeitverläufen des Mehrwegefehlers für den P1-Range (Fig. 6-11) sind zusätzlich kleine Unterschiede in den Zeitverläufen (Beispiele ebenfalls pink umrandet) erkennbar, die sich nicht durch die Datenbasis erklären lassen. Vielmehr bilden sich hier empfängerinterne

Unterschiede bei der Ableitung der P1-Rangemessung ab, die technisch plausibel bei zivilen GPS-Empfängern erscheinen.

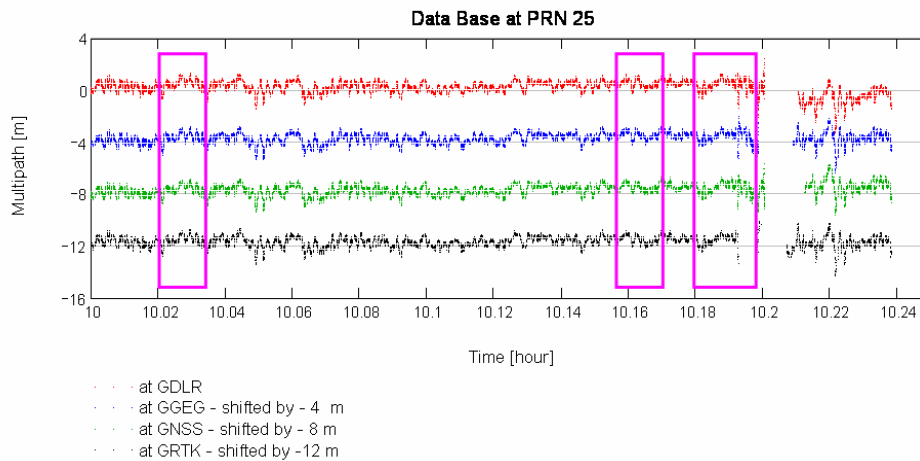


Fig. 6-10 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 25) für die C/A-Rangemessungen (30.01.2007)

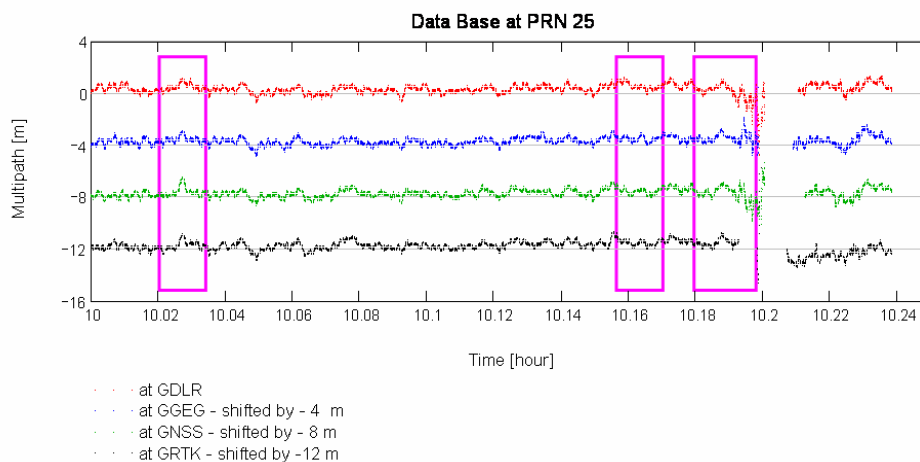


Fig. 6-11 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 25) für die P1-Rangemessungen (30.01.2007)

Am 31.01.2007 besitzen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der ROVER (Fig. 6-12) einen ähnlichen Kurvenverlauf. Kleine Unterschiede wie am 30.01.2007 sind in den Standardabweichungen nicht mehr erkennbar. Da hier der Messzeitraum eine fast doppelt so große Anzahl von Samples lieferte, reduzieren sich die aus der Datenbasis kommenden Unterschiede in den bestimmten Standardabweichungen. Auch hier gilt für fast alle Satelliten, dass die bestimmten Mehrwegefehler im Bereich von -5 m und + 5m liegen. Die zu beobachtende Ausnahme betrifft den Mehrwegefehler für den C/A-Range von PRN 1, jedoch nur beim GDLR-Empfänger. Dieser Effekt tritt nur am GDLR zweimal auf und entspricht einem einmaligen Range-Sprung von knapp -30 m. Dem folgt eine Unterbrechung der Datenbereitstellung, die aber auch bei den anderen ROVER(n) auftritt. Diese sind dem Zeitraums des Satellitenuntergangs zugeordnet und treten nach 7:40 Uhr auf.

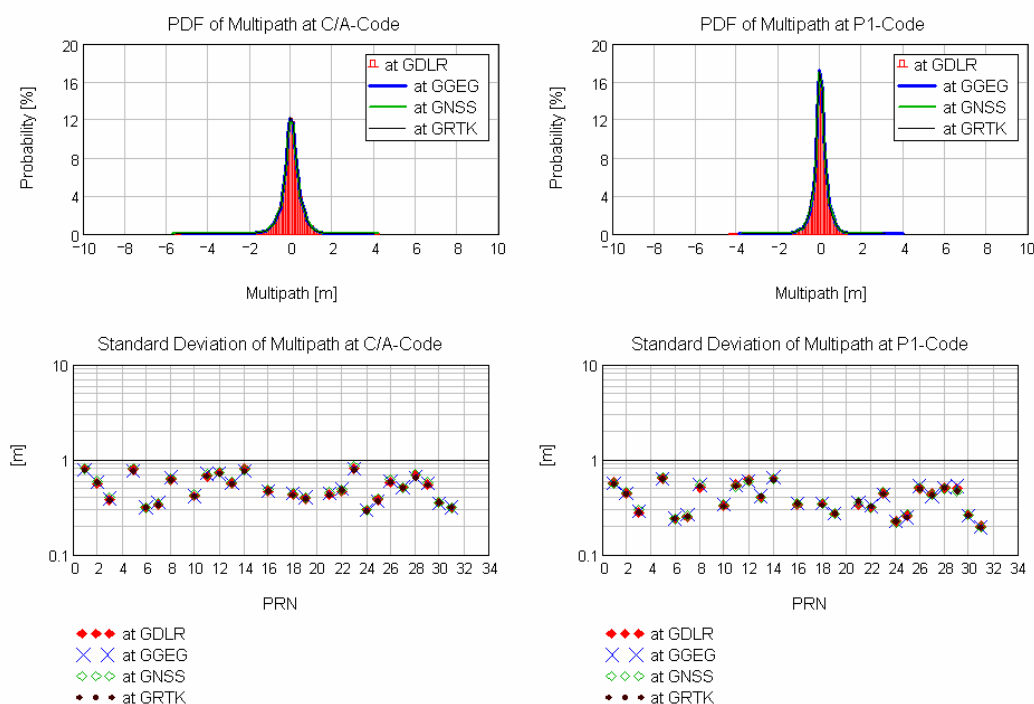


Fig. 6-12 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (31.01.2007)

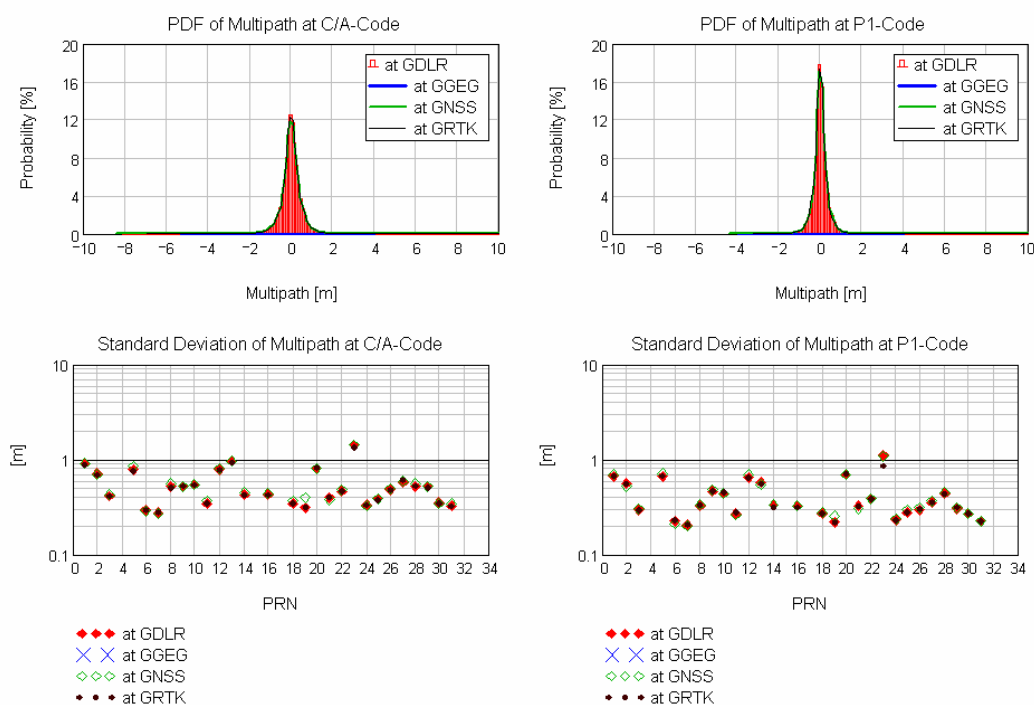


Fig. 6-13 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (01.02.2007)

Am 01.02.2007 besitzen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der ROVER (Fig. 6-13) einen ähnlichen Kurvenverlauf. Kleine Unterschiede in den Standardabweichungen sind hier beim PRN 19 zu erkennen, die wieder in Unterschieden der Datenbasis begründet sind, hier aber aus dem unterschiedlichen Trackingverhalten der Empfänger des auf „unhealthy“ gesetzten PRN 19 resultieren. Darüber hinaus besitzt PRN 23 eine deutlich über 1 m liegende Standardabweichung. Auch hier gilt für fast alle Satelliten, dass die bestimmten Mehrwegefehler im Bereich von -5 m und + 5 m liegen. Die zu beobachtende Ausnahme betrifft die Mehrwegefehler für PRN 23 und ist damit kompatibel zur erhöhten Standardabweichung. Da der Satellitenuntergang erst ~8:40 Uhr erfolgt, tritt dieser Mehrwegefehler nicht bei sehr geringen Elevationswinkeln auf und ist dem Fahrtabschnitt in der Warnowwerft zuzuordnen. Das Zeitverhalten des Mehrwegefehlers vom PRN 23 ist in Fig. 6-14 dargestellt. Im Zeitraum von 7:45 Uhr bis 8:00 Uhr liegt die Scandline Fähre direkt neben dem Forschungsschiff.

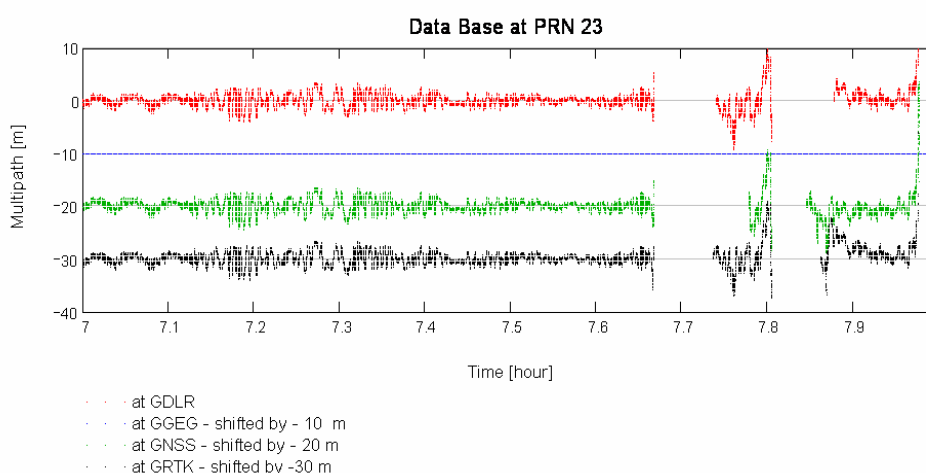


Fig. 6-14 Zeitverlauf des Mehrwegefehlers (PRN 23) für die C/A-Rangemessungen (01.02.2007)

Am 02.02.2007 (Fig. 6-15) zeigen sich keine signifikanten Unterschiede weder in der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion noch in den satellitenspezifischen Standardabweichungen.

Die Standardabweichungen des Mehrwegefehlers liegen generell unter 1 m. Fast alle Mehrwegefehler liegen im Bereich von -5 m und + 5 m. Eine geringe Abweichung ist beim PRN 13 zu beobachten, die sich wiederum aus Unterschieden der Datenbasis der ROVER ergibt.

- SF 16** Bezüglich Auftretens von Mehrwegeeffekten in den Messungen des Forschungsschiffes erscheint der Messfahrtabschnitt am 01.02.2007 in der Warnow-Werft am interessantesten. Es wird empfohlen, den 01.02. zwischen 7:30 und 8:30 Uhr einer Detailanalyse mit Georeferenzierung und zugeordneten Videoaufnahmen zu unterziehen.

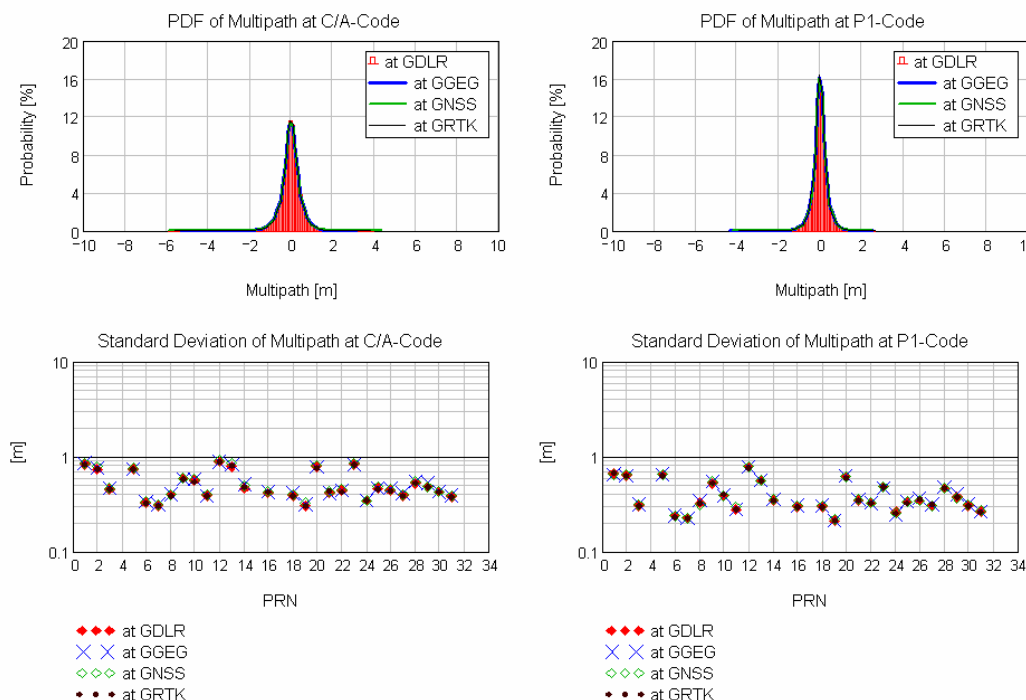


Fig. 6-15 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Mehrwegefehler auf den verschiedenen Codes sowie satellitenspezifische Standardabweichungen des Mehrwegefehlers an den ROVER(n) (02.02.2007)

6.2 Erhöhte Mehrwegefehler im Zeit- und Satellitenbezug²²

Der CSD-Analysator wurde so modifiziert, dass für Mehrwegefehler über 5 m bzw. unter -5 m eine temporäre Datenaufzeichnung in einem Zusatzergebnisfile IncreasedMultipath.dat initiiert wird. Ziel ist es, direkt erhöhte Werte zu erfassen, da diese u.U. als Einzelereignisse nicht zwangsläufig in einer erhöhten Standardabweichung erkennbar abbilden müssen. Die Analyse beschränkt sich auf den Mehrwegefehler auf der C/A-Rangemessung und auf den der P1-Rangemessung. Für die Interpretation gelten folgende Thesen:

- Schätzwerte für den C/A-Code besitzen den höchsten Grad an Vertrauenswürdigkeit, weil hier ein direkter Signalempfang vorliegt.
- Mehrwegeschätzungen für den P1-Code fallen in der Regel geringer aus, folgen aber dem Verhalten auf dem C/A-Code. Ein erhöhter Mehrwegefehler auf der C/A-Range ohne eine Angabe für den P-Range kann 2 Ursachen haben: entweder waren bereits keine P-Rangemessungen verfügbar oder der Wert liegt technisch bedingt unter 5 m.
- Liegt der Schätzwert für den P1-Code deutlich über dem des C/A-Codes sind eher empängerinterne Ursachen anzunehmen, die bei der Ableitung der P-Code zugeordneten Entfernungsmessungen entstehen.

Referenzstation

²² Die in diesem Kapitel enthaltenen Grafiken beruhen auf den pro Station durch den CSD-Analysator generierten File IncreasedMultipath.dat, der nur die Messwerte enthält, für die der Mehrwegefehler außerhalb des 5m-Wertebereiches lag. Die Darstellung erfolgt mit IncreasedMultipath.xcmd.

Die Messpunkte bei denen der bestimmte Mehrwegefehler oberhalb 5 m bzw. unterhalb -5 m lag, sind für die Referenzstation in Fig. 6-16 bis Fig. 6-19 dargestellt. Erhöhte Mehrwegefehler sind eindeutig niedrigen Elevationswinkeln zugeordnet. Es ist auch erkennbar, dass die für die C/A- und P1-Rangemessung gestellten Erwartungen erfüllt sind, d.h. erhöhte Mehrwegefehler korrelieren miteinander oder es gibt für den P1-Range keine Angaben.

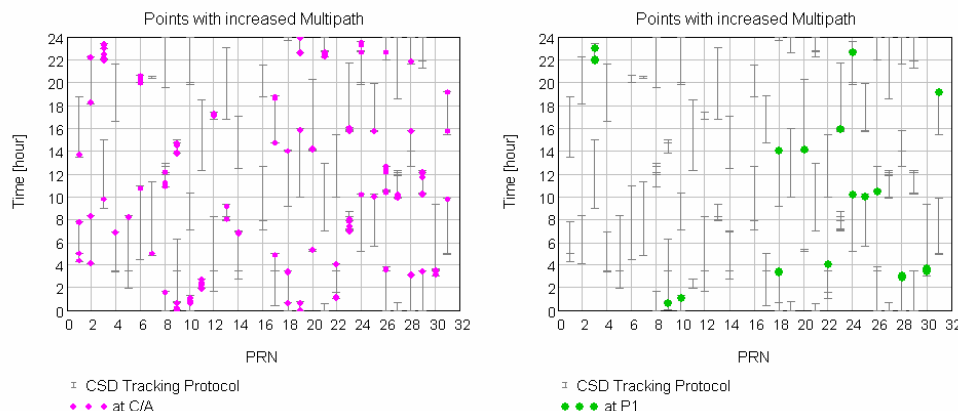


Fig. 6-16 Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (30.01.2007)

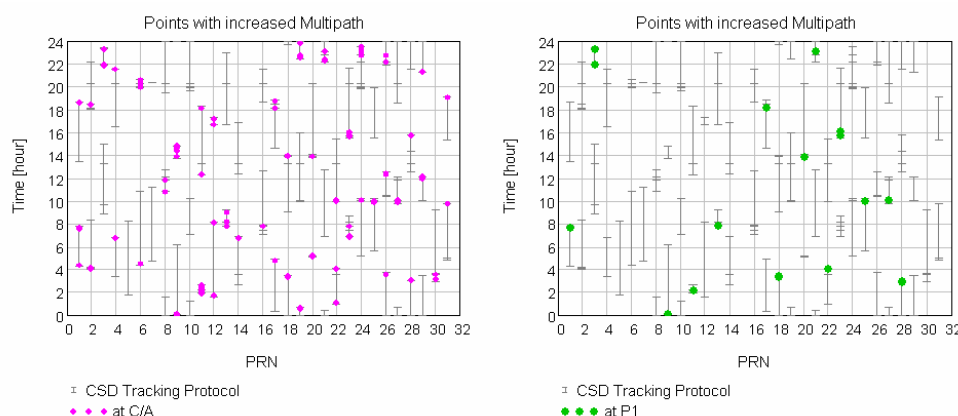


Fig. 6-17 Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (31.01.2007)

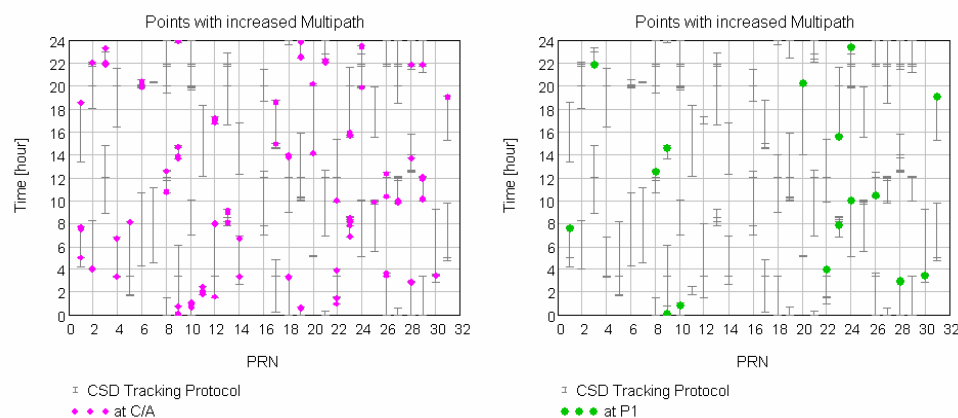


Fig. 6-18 Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (01.02.2007)

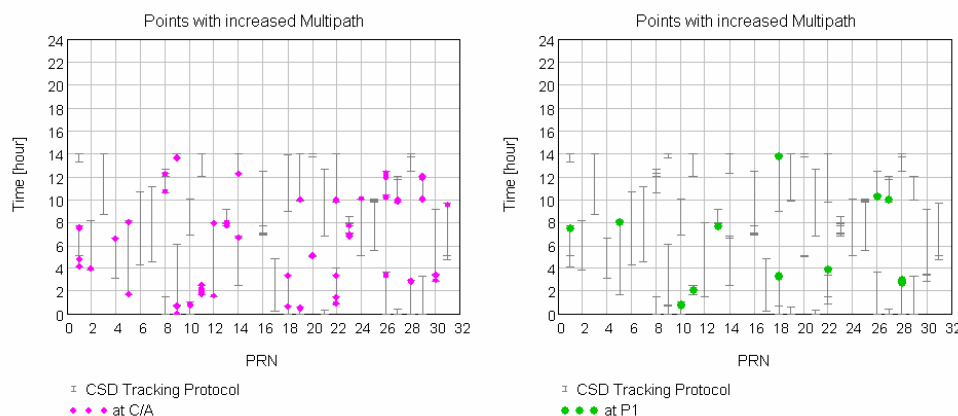


Fig. 6-19 Erhöhter Mehrwegefehler an der Referenzstation (02.02.2007)

Interessante Ausnahmen, bei denen der erhöhte Mehrwegefehler nicht explizit niedrigen Elevationswinkeln zugeordnet werden kann, sind PRN 8, 9, 13, 23 und 24. Dass das Signal vom PRN 13 stärker durch Mehrwegeeffekte beeinflusst ist, wurde bereits in den Standardabweichungen des Mehrwegefehlers und in seinem Zeitverhalten (Fig. 6-7) deutlich.

SF 17

Mehrwegefehler von mehr als 5 m sind an der Referenzstation mehrfach zu beobachten. Sie treten vorwiegend bei niedrigen Elevationswinkeln auf. Ihre Wiederholbarkeit lässt auf umgebungsbedingte Effekte schließen. Darüber hinaus gibt es Einzelereignisse, bei denen die Zeitsynchronisation (Sternentag) und die Signaturähnlichkeit nicht so gegeben sind, die aber in zeitlicher Nähe zum routinemäßig ablaufenden Fährverkehr stehen. Es empfiehlt sich folglich die Untersuchung von erhöhten Mehrwegefehlern in ihrer Elevations- und Azimutabhängigkeit und in ihrem Zeitbezug.

ROVER

Eine Sichtung der Ergebnisse zeigte, dass die für die C/A- und P1-Rangemessung gestellten Erwartungen auch bei den ROVER(n) erfüllt sind, d.h. erhöhte Mehrwegefehler korrelieren miteinander oder es gibt für den P1-Range keine Angaben. Folglich beschränken sich die Darstellungen und Aussagen auf die Angaben des Mehrwegefehlers, der für die C/A-Rangemessung bestimmt wurde.

Am 30.01.2007 liegen alle Mehrwegefehler der C/A-Rangemessung im Bereich {-5 m, +5 m}.

An den Folgetagen (Fig. 6-20 bis Fig. 6-22) sind erhöhte Mehrwegefehler bis auf eine Ausnahme den Phasen des Satellitenauf- oder -untergangs zuzuordnen. Unterschiede zwischen den ROVER(n) lassen sich hier durch Unterschiede in der Datenverfügbarkeit erklären.

Am 01.02.2007 besitzt PRN 23 auf allen ROVER(n) einen erhöhten Mehrwegefehler, der aber bereits im vorhergehenden Kapitel diskutiert und in Fig. 6-14 dargestellt wurde.

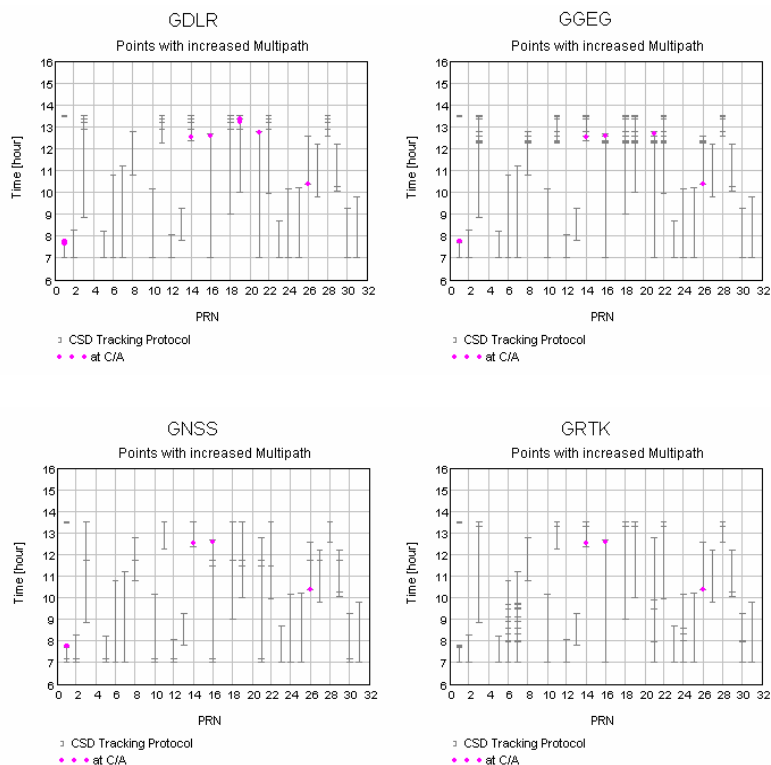


Fig. 6-20 Erhöhter Mehrwegefehler an den ROVER(n) (31.01.2007)

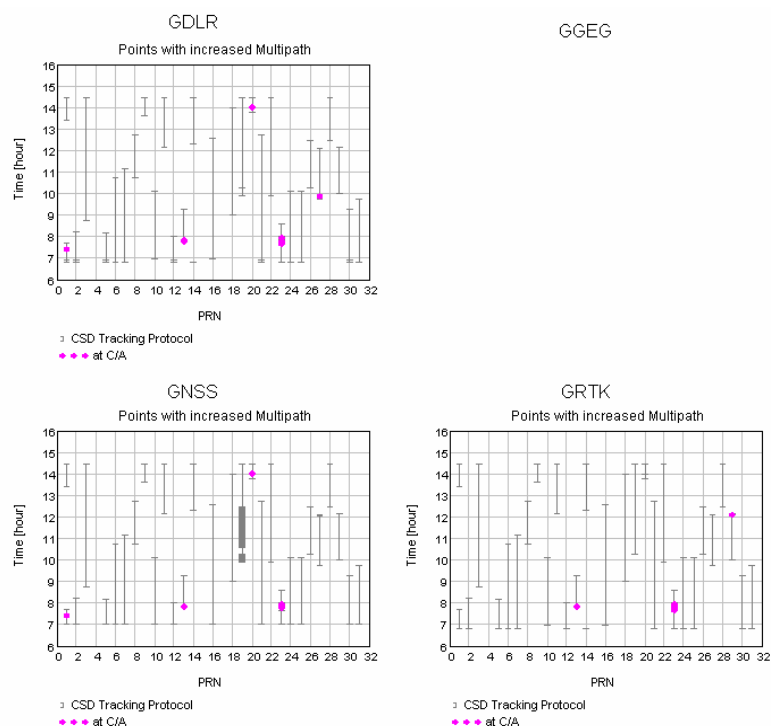


Fig. 6-21 Erhöhter Mehrwegefehler an den ROVER(n) (01.02.2007)

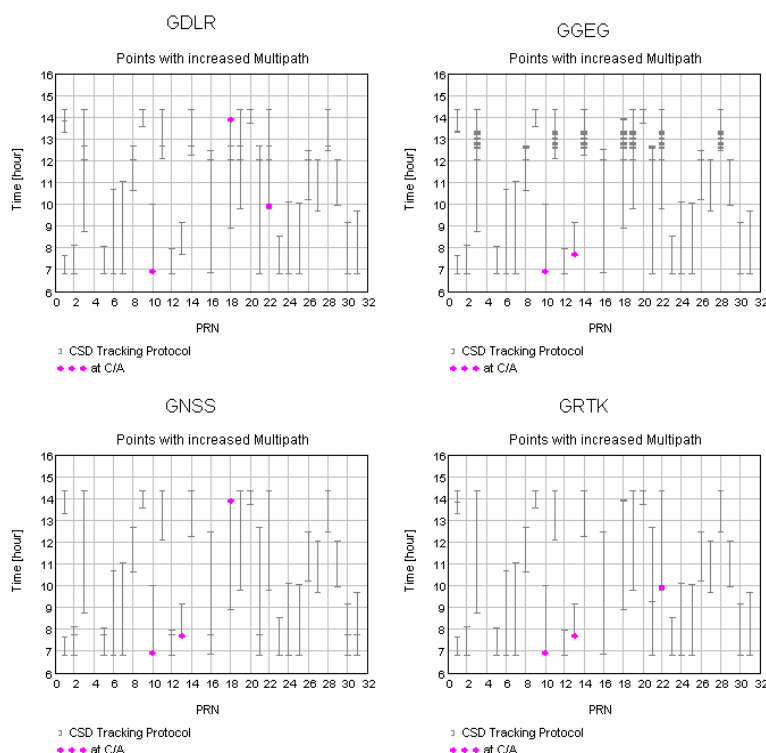


Fig. 6-22 Erhöhter Mehrwegefehler an den ROVER(n) (02.02.2007)

SF 18

Mehrwegefehler von mehr als 5 m an den ROVER-Empfängern sind selten zu beobachten. Sie treten vorwiegend bei niedrigen Elevationswinkeln an allen ROVER(n) auf, wenn die verfügbaren Daten eine Bestimmung zuließen.

Bei der Passage in Nähe der Warnow-Werft wird einmalig ein erhöhter Mehrwegefehler bei höheren Elevationswinkeln detektiert. Dieser erreicht hier Werte von deutlich über 10 m.

Daraus resultiert, dass beim normalen Schiffsverkehr Mehrwegeeffekte weitestgehend durch Wahl des Antennenstandortes in vertretbaren Größenordnungen gehalten werden kann. Bei Anlegemanövern jedoch, wo in Schiffsnähe Krananlagen oder Dockaufbauten installiert sind, ist diese Aussage so nicht haltbar. Mit Störungen ähnlich wie beim PRN 23 am 01.02.2007 ist zu rechnen.

6.3 Mehrwegefehler im räumlichen Bezug

Eine verbesserte Interpretation von aufgetretenen Mehrwegefehlern wird erreicht, wenn sie im räumlichen Bezug abgebildet werden. Diese Darstellungen sind für die Referenzstation und für die ROVER in Kapitel 12 zusammenfassend dargestellt. Fazit dieser Darstellungen ist

- Mehrwegefehler außerhalb des 5m-bereiches treten in der Regel bei Elevationswinkeln unter 15° auf.
- Nur bei der Referenzstation werden solche Fehler auch bei höheren Elevationswinkeln beobachtet. Diese besitzen einen deutlichen Richtungsbezug (NW: Einfahrt Warnow-Überseehafen; S/SW: Fährterminal; S: Infrastruktur Pier 1).

7 Zusammenfassung

In den während der Messkampagne sowohl an der Referenzstation als auch an den ROVER(N) aufgezeichneten und ins RINEX-Format konvertierten Rohdaten gibt es vereinzelt Zeitmarken, für die keinerlei Daten enthalten sind. Weder bei der Referenzstation an Folgetagen noch bei den parallel betriebenen ROVER-Empfängern ist ein Zusammenhang zur Satellitenanzahl, zu Konstellationswechseln, zum geometrischen Szenario noch zu Ausbreitungsfehlern nachweisbar. Im Extremfall (GGEG, 02.02.2007) wurden nur an 99.36% der Zeitmarken des Messzeitraums Daten bereitgestellt. Dieses Phänomen wurde auch schon bei anderen EVnet-Stationen beobachtet und ist eher als eine individuelle Reaktion des einzelnen Empfängers auf seine Konfigurierung und damit auf intern ablaufende Prozesse zu sehen. Bei der Entwicklung von Echtzeitprozessoren sollte dieser Effekt jedoch in dem Sinne beachtet werden, dass derartige Datenlücken, insofern sie nur eine oder wenige Epochen andauern, nicht zwangsläufig zu Neuinitialisierungen laufender Prozesse führen sollten.

Ein Bewertungskriterium der Trägerphasen war die Anzahl detektierter Cycle Slips. Ihre Anzahl liegt sowohl bei der Referenzstation als auch bei den ROVER(n) deutlich über denen von EVnet-Stationen. Ursachen dafür sind bei der Referenzstation:

- Der bewusst gewählte nicht optimale Standort der Referenzstation und der Signalempfang mit einer Elevationsmaske von 5° lässt einen erhöhten Einfluss von Signalstörungen in Folge von Mehrwegeausbreitung zu. Das begründet auch das gehäufte Auftreten von Cycle Slips bei niedrigen Elevationswinkeln (bei Satellitenauf- und -untergang oder bei kurzen Pässen).
- Die Referenzstation trackte neben den GPS-Signalen auch verfügbare GLONASS-Signale. An der Referenzstation werden allein mehr als 90% aller detektierten Cycle Slips bei den GLONASS-Signalen beobachtet.
- Im Gegensatz zu den EVnet-Stationen, die vorwiegend mit Abtastfrequenzen von 50 bzw. 25 Hz betrieben werden, wurden die Referenzstation mit einer Abtastfrequenz von 20 Hz betrieben. Um eine Modellierung der Phasendynamik mit einer repräsentativen Anzahl von Folgemesswerten zu ermöglichen, wurde der Modellierungszeitraum auf 5 s ausgedehnt. Dies impliziert einen Anstieg des Phasenmodellierungsfehlers und erhöht das Risiko der Detektion von Pseudo Cycle Slips. Die vorwiegende Zuordnung der Cycle Slips (Satellitenauf- und -untergänge) zeigt jedoch, dass dieser Effekt als Ursache weitestgehend bei der Referenzstation ausgeschlossen werden kann.

Ursachen für die erhöhte Anzahl von detektierten Cycle Slips bei den ROVER-Empfängern sind:

- Bei den ROVER-Empfängern, die nur GPS-Signale verarbeiten (GGEG und GDLR), liegt die Anzahl detektierter Cycle Slips über denen der Referenzstation, wenn gleiche Messzeiträume betrachtet werden. Jedoch ist festzustellen, dass ein synchronisiertes Auftreten zwischen den ROVER(n) oder zwischen ihnen und denen der Referenzstation nicht erkennbar ist. Eine Tagesabhängigkeit ist ebenfalls nicht allgemeingültig für alle Empfänger nachweisbar.
- Zwei der vier ROVER-Empfänger verarbeiten GLONASS-Signale. Beim GNSS-Empfänger wurden mehr als 50% und beim GRTK-Empfänger mehr als 75% aller Cycle Slips bei den GLONASS-Signalen beobachtet.

- Nur bei den ROVER(n) ist zu beobachten, dass Cycle Slips parallel auf mehreren Satelliten gleichzeitig detektiert werden. Hier handelt es sich um eine durch den CSD für notwendig erachtete Nachkorrektur von auftretenden Uhrenrücksetzkorrekturen.
- Ein erhöhtes Auftreten von Cycle Slips ist zeitlich den Fahrtanteilen des Schiffes auf der Ostsee zuzuordnen. Wie auch aus dem Phasenrauschen ablesbar, handelt es sich hier vorwiegend um detektierte Pseudo Cycle Slips in Folge des Anstiegs des Modellierungsfehlers. Das wird auch dadurch bestätigt, dass die Daten des GRTK-Empfängers, der nur mit 10 Hz betrieben wurde, davon stärker betroffen sind.

Bei der Analyse des Phasenrauschens zeigte sich für die Referenzstation, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen als auch die satellitenspezifischen Standardabweichungen ein mit den EVNet-Stationen vergleichbares Verhalten aufweisen. Bei den ROVER(n) konnte jedoch der Zusammenhang zwischen erhöhtem Phasenrauschen und gestiegenem Modellierungsfehler der Phasendynamik erbracht werden. Die Folge sind breitere Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen und höhere Standardabweichungen des Phasenrauschens. Wenn folglich von geschätztem Phasenrauschen gesprochen wird, muss die verfahrensbedingte Abbildung der Empfängerdynamik (Wind, Wellengang, Schiffsvibration) als Schätzfehler mit diskutiert werden. Bezogen auf die Stabilität des CSD ist es jedoch zielführend, die Eigenschätzung von Phasenrauschen anstatt Standardwerte des echten Phasenrauschens zur Cycle Slip Erkennung zu nutzen. Im Fall des Zwei- oder Mehrfrequenzsignalempfangs wird aber das Potenzial gesehen, die Detektion von Pseudo Cycle Slip weiter zu reduzieren, in dem weitere Linearkombination in die Entscheidung einbezogen werden.

Als eine weitere die Signalqualität beschreibende Größe wurde der SNR betrachtet. Bei der Interpretation der Messergebnisse sind 2 Dinge zu beachten. Einerseits werden SNR-Werte nur mit einer Quantifizierungsgenauigkeit von 0.1 dB-Hz ausgegeben. Andererseits lässt sich aus SNR-Werten zweier Empfänger, die an einer Antenne betrieben wurden, eine Messgenauigkeit des SNR abschätzen. So zeigte sich, dass die mittlere Abweichung zweier unabhängiger Messungen kleiner der Quantifizierungsgenauigkeit ist und dass die Standardabweichung der Differenz in der Größenordnung von 1 dB-Hz liegt. Damit ist eine Diskussion von Unterschieden in momentanen SNR-Werten (gleiches geometrisches Szenario oder gleiche Antenne), die geringer als 3 dB-Hz ausfallen, nicht sinnvoll. Um diese Problematik zu reduzieren, wurde sich auf Mittelwert und Standardabweichung des SNR pro Minute konzentriert.

Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen des Minutenmittelwertes des SNR besitzen bei der Referenzstation ein identisches Verhalten an allen 4 Messtagen. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der verschiedenen ROVER besitzen auch pro Tag einen nahezu identischen Kurvenverlauf. Erkennbare, kleine Änderungen in den Kurven an Folgetagen sind einerseits durch die unterschiedliche Länge der Messzeiträume begründbar. Andererseits zeigen gerade die Standardabweichungen des SNR pro Minute, dass das SNR der GNSS-Signale an Bord des Schiffes bedingt durch die veränderten Empfangsbedingungen stärker variiert.

Wird das Zeitverhalten des Mittelwertes und der Standardabweichung des SNR betrachtet, so ist ein nahezu identisches Verhalten an Folgetagen unter gleichen Empfangsbedingungen zu beobachten. Temporäre SNR-Einbrüche, die oftmals gepaart mit einer erhöhten Standardabweichung des SNR sind, sind bei der Referenzstation zu beobachten. Für die Referenzstationen empfiehlt sich die Aufbereitung des SNR (sowohl Mittelwerte als auch Standardabweichung) in seiner Abhängigkeit vom geometrischen Szenario (Elevation und Azimut), um zwischen systematischen und temporären Störungen unterscheiden zu können. Bei der Referenzstation wurde ein signifikanter Sonderfall beobachtet, bei dem der SNR um mehr als 5 dB-Hz mit einer an Folgetagen sich wiederholenden Signatur absinkt. Diesem

Effekt kann ein erhöhtes Phasenrauschen sowie eine erhöhte Variation des geschätzten Mehrwegefehlers zugeordnet werden.

Nutzt man als Indikator für Anomalien eine erhöhte Standardabweichung des SNR (z.B. aus dem Tageszusammenhang zwischen Standardabweichung des SNR und seinem Minutenmittelwert), so sind tagesspezifische Ausreißer erkennbar. Diese entsprechen jedoch nicht unbedingt Situationen, bei denen auch Effekte in Form von erhöhten Mehrwegefehlern oder Phasenrauschen auftraten. Dieser Ansatz bedarf zumindest noch einer Qualifizierung gerade in Hinblick auf die dafür erforderliche Beschreibung des Nominalverhaltens. Das wird gerade dann deutlich, wenn man die Messwerte der ROVER-Empfänger einzeln nach Ausreißern mit diesem Verfahren absucht.

Ein definierter Zusammenhang zwischen dem SNR und dem Phasenrauschen konnte an der Referenzstation nachgewiesen werden. Weil die Phasenschätzungen bei den ROVER-Empfängern durch den angestiegenen Modellierungsfehler der Phasendynamik verfälscht sind, entsteht eine Abhängigkeit von der Messsituation. Nur am 30.01.2007, bei ausschließlichen Fahrten in Binnengewässern, folgt der funktionale Zusammenhang zwischen Phasenrauschen und SNR bei den ROVER(n) dem der Referenzstation.

Mehrwegefehler wurden durch Verwendung des „Carrier Smoothing“ Verfahrens bestimmt, wobei eine Zeitkonstante von 150 s generell verwendet wurde. Interessanterweise liegt der so geschätzte Mehrwegefehler sowohl bei der Referenzstation als auch bei den ROVER(n) vorwiegend im Bereich von ± 2 m. Die pro Satellit bestimmte Standardabweichung des Mehrwegefehlers liegt unter 2 m, wenn im Fall der Referenzstation die Daten eines Tages zur Berechnung genutzt wurden. Werte bis zu 2 m treten auf, wenn nur die Daten eines kurzen Satellitendurchgangs, also unter geringeren Elevationswinkeln verwendet wurden. Bei den Ergebnissen der ROVER ist eine stärkere Variation der satellitenspezifischen Standardabweichungen zu beobachten, die aber auch hier generell unter 2 m liegt. Daraus ist ableitbar, dass Mehrwegefehler außerhalb eines ± 5 m Wertebereiches die Ausnahme sind, weil sie in den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Mehrwegefehlers und seiner Standardabweichung nicht sichtbar werden.

Um solche Ereignisse zu identifizieren, wurde zusätzlich eine protokollarische Aufzeichnung von Mehrwegefehlern unter Angabe des betroffenen Satelliten und des Zeitpunkts vorgenommen, wenn dieser größer +5 oder kleiner -5m war. Bildet man diese auf das Trackingprotokoll des Phasenprozessors ab, so zeigt sich bei der Referenzstation, dass diese bei niedrigen Elevationswinkeln gehäuft zu beobachten sind. Es empfiehlt sich die Aufbereitung des Mehrwegefehlers in seiner Abhängigkeit vom geometrischen Szenario (Elevation und Azimut), um zwischen systematischen und temporären Störungen an der Referenzstation unterscheiden zu können und um letztlich den Referenzstandort hinsichtlich des Auftretens von Mehrwegefehlern zu bewerten. Wenn Extremwerte von Mehrwegefehlern beobachtet werden, so folgt ihnen oftmals eine signalspezifische Unterbrechung der Datenbereitstellung.

Bei den ROVER(n) werden Mehrwegefehler größer 5 m an fast allen Messtagen nur beim Satelliten auf- oder -untergang detektiert. Eine Ausnahme wird beim PRN 23 am 01.02.2007 beobachtet, bei dem laut Protokoll das Forschungsschiff im Bereich der Warnowwerft sehr nah eine Scandline-Fähre passierte.

Obwohl die während dieser Messkampagne bestimmten Mehrwegefehler eher als moderat einzustufen sind, sind sie auf maritime Anwendungen nicht allgemeingültig übertragbar. Folgeuntersuchungen sind notwendig, um das Mehrwegeverhalten in der Nähe von Kai-Anlagen sowohl für Schiffe als auch für landseitige Nutzer zu bestimmen.

8 Referenzen

[Ref 1]	T. Noack: ALEGRO-TN-Messaufbau
[Ref 2]	TN GalileoNav „Amplitudenpreprozessor“
[Ref 3]	TN GalileoNav „Phasenpreprozessor“
[Ref 4]	http://www.navcen.uscg.gov/ftp/GPS/archives/status/

9 Anlage A: Genutzte Software zur Signalanalyse und Ergebnisse

9.1 CSD-Prozessor

9.1.1 Konfiguration

Der CSD ist so konfiguriert, dass nur eine Cycle Slip Detektion jedoch keine Cycle Slip Korrektur ausgeführt wird. Damit wird vermieden, dass eine Fehlerfortpflanzung bei ausgeführten Cycle Slip Korrekturen überhaupt auftreten kann. Die zugeordneten on-line Ergebnisse werden in den Files vom Typ PHN_PRN_F(HH).dat (PRN=Sat-ID, F=Carrier-ID, HH=hour) mit der verwendeten Samplingfrequenz aufgezeichnet. Zusätzlich werden Ergebnisfiles vom Typ sigPHN_PRN_F.dat generiert, in die die Standardabweichung des Phasenrauschens pro Minute eingetragen wird. Darüber hinaus gibt es weitere Dateien, die Hilfsinformationen zur Interpretation der Ergebnisse enthalten.

```

/* CONFIGURATION of PHASEPROCESSOR */
/* ===== */

/* PART 1: RINEX DRIVER */
/* ----- */
bpath   = F:\data\Messkampagne_Rostock\02_02_2007\GGEG\RINEX2\  (directory of RINEX files )
station = GEGS                                                  (name of measuring station )
bname   = GEGSxxx0.07o                                         (basic name of RINEX files )
date    = 2007 02 02                                           (date of raw data )

/* PART 2: COMMON CONTROL */
/* ----- */
dt       = 0.05                                                (time step width = 1/sampling frequency )
start    = 6:00                                                 (start time (hour, minutes )
end       = 15:00                                               (end time (hour, minutes )

/* PART 3: CSD CONTROL */
/* ----- */
PHAssegment = 5                                                (length of phase segment in seconds )
ORDERcycle  = 2                                                (polynomial order for cycle slip detection )
MODEcycle   = 0                                                (0=detection 1=correction )
ERRlevel    = 1.0                                              (CSD detection level for cycles in cyle )
CORRtype    = f                                                (CSD correction type (integer/float )
)

/* PART 4: CSD OUTPUT */
/* ----- */
rpath = F:\data\Messkampagne_Rostock\02_02_2007\GGEG\CSD_output\ (directory of result files )
RECphasenoise = 1                                                (recording phase variances )
RECunbiasedTEC = 0                                              (recording of unbiased tec from phases )
RECSigma = 1                                                    (recording of tmp. phase noise sigma )
SIGMAlength = 60                                                (phase segment length for sigma )

```

Um die Daten des jeweiligen Empfängers verarbeiten zu können, ist die Konfigurationsdatei anzupassen:

- unter RINEX DRIVER der Pfad und Basisname der RINEX-Files sowie Stationsname und Messdatum
- unter COMMON CONTROL die inverse Samplingfrequenz (GBAS, GGEG, GDLR, GNSS: dt=0.05 und beim GRTK dt=0.10)

- unter CSD OUTPUT der Pfad für die Ablage der generierten Ergebnisfiles.

9.1.2 Eingangsdaten des CSD

Als Eingangsdaten wurden die unter ...\\RINEX_DLR\\... abgelegten Daten im modifizierten RINEX 2.0 Format verwendet. Für die dargestellte Konfigurationsdatei (siehe 9.1.1) werden also im Directory

```
F:\data\Messkampagne_Rostock\02_02_2007\GGEG\RINEX2\
```

die Dateien

```
GEGS033G.070
GEGS033H.070
...
GEGS033N.070
```

erwartet.²³ Fehlende Datensätze werden wie nicht verfügbare Daten interpretiert.

9.1.3 Ausgangsdaten des CSD

Alle Ausgangsdaten werden in spezifischen Dateien unter einem gemeinsamen Pfad abgelegt. Für unsere Konfigurationsdatei lautet dieser

```
F:\data\Messkampagne_Rostock\02_02_2007\GGEG\CSD_output\ GEGS[070202]\
```

und wird aus den Einträgen rpath, station und date generiert.

Ergebnisdateien sind:

PHN PRN F(HH).dat

Filename:	PHN	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
	F	=	Identifikationsnummer der Trägerfrequenz (0: GPS L1 oder GLONASS im oberen L-Band, 1: GPS L2 oder GLONASS im unteren L-Band)
	HH	=	bei Datenraten über 1 Hz zur Identifikation der Stunde (00...23), sonst unverändert HH

Die Einträge erfolgen zeilenweise pro Messpunkt.

Fileformat	time	=	Zeit in Tagessekunden
	ifre	=	Identifikationsnummer der Trägerfrequenz (0: oberes L-Band, 1: unteres L-Band)
	phase	=	Trägerphasenmesswert in Meter
	rate	=	Rate der gemessenen Trägerphase in m/s
	sigNoise	=	Standardabweichung des Modellierungsfehlers innerhalb des vorhergehenden Zeitraums, der durch PHAsegment bestimmt ist (cycle)

²³ Die gesamte Datenarchivierung (Rohdaten, Ergebnisse) ist in der TN [Ref 1] beschrieben. Hier und im Folgenden werden Pfade nur in Bezug zu den Beispielen von Konfigurationsdateien benannt.

	dN	=	relative Mehrdeutigkeit (gleich 0, wenn der CSD nur im Detektionsmodus arbeitet)
	PHnoise	=	Geschätzter Momentanwert des Phasenrauschens (cycle)
	qc_flag	=	Statusflag der Trägerphase
	-2:		keine Daten
	0:		CSD ist in Akquisition
	1:		Cycle Slip detektiert
	2:		zur Weiterverwendung freigegeben
	3:		korrigierter Cycle Slip oder Uhrenrücksetzoperation

sigPHN PRN F.dat

Filename:	PHN	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
	F	=	Identifikationsnummer der Trägerfrequenz (0: GPS L1 oder GLONASS im oberen L-Band, 1: GPS L2 oder GLONASS im unteren L-Band)

Die Einträge erfolgen zeilenweise jedoch mit einer reduzierten Updaterate, die durch SIGMA-length (s) bestimmt ist, also hier pro Minute.

Fileformat	time	=	Zeit in Tagessekunden
	isat	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
	sigma	=	Standardabweichung des geschätzten Phasenrauschens pro Minute (cycle)
	count	=	Anzahl der Messwerte, die zur Berechnung der Standardabweichung genutzt wurden

Availability.dat

Ein zeilenweiser Eintrag wird generiert, wenn der CSD ein trägerspezifisches Trackingsende detektiert hat. Dieses wird entweder durch den Satellitenuntergang oder den Neustart des CSD erkannt. Ein Neustart wird initiiert, wenn eine Sequenz von Datenlücken oder von Cycle Slips auftrat. Überschreitet ihre Anzahl 10% der für die Modellierung notwendigen Anzahl von aufeinander folgenden Messwerten (PHasegment/dt), also in unserem Fall 10, so ist die Neustartbedingung erfüllt.

Fileformat	iusr	=	Identifikationsnummer des Empfängers
	isat	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
	ifre	=	Identifikationsnummer der Trägerfrequenz
	tstart	=	Epoche mit erstem Messeintrag
	tend	=	Epoche mit letztem Messeintrag

CYCLE.dat

Ein zeilenweiser Eintrag wird generiert, wenn der CSD einen Cycle Slip detektiert oder eine Uhrenrücksetzoperation kompensiert hat. Treten diese Fälle im Analysezeitraum nicht auf, so fehlt diese Datei. Nach dem Texteintrag „CSD CYCLE SLIP:“ werden folgende Angaben geliefert:

Fileformat	time	=	Zeit in Tagessekunden
	iusr	=	Identifikationsnummer des Empfängers
	isat	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
	ifre	=	Identifikationsnummer der Trägerfrequenz
	qc_flag	=	Statusflag der Trägerphase entweder 1 oder 3 1: Cycle Slip detektiert 3: Cycle Slip oder Uhrenrücksetzoperation detektiert und korrigiert.
	predERR	=	Prädiktionsfehler Typ 1
	predError	=	Prädiktionsfehler Typ 2
	sigNOISE	=	Letztes Update der Standardabweichung des Modellierungsfehlers innerhalb eines Zeitraums, der durch PHAsegment bestimmt ist (cycle)
	dtime	=	Alter des Polynoms in s

LOGfile.dat

In LOGfile.dat sind allgemeingültige Prozessierungsinformationen enthalten wie Beginn und Ende der Initialisierung als auch der Prozessierung. Darüber hinaus wird jede volle Minute der Prozessierungsfortschritt vermerkt. Ein für die Datenanalyse interessanter Eintrag betrifft die Ausweisung von Epochen, für die keinerlei Daten im RINEX-File enthalten sind. Dieser lautet dann beispielhaft

```
RINEX CONTROL:      Missing RINEX data from  48050.950 to  48051.400
```

Weitere für ALEGRO spezifische Ausgabedateien sind:

availRINEX.dat

Ein zeilenweiser Eintrag wird jede volle Sekunde generiert und dient zur zusammenfassenden Darstellung getrackter Satelliten anhand eines vorhandenen Dateneintrages im RINEX-File.

Fileformat	time	=	Zeit in Tagessekunden
	flag[isat=0]	=	0: keine Daten, 1: Daten vorhanden
	flag[isat=1]	=	0: keine Daten, 1: Daten vorhanden
	...		
	flag[isat=63]	=	0: keine Daten, 1: Daten vorhanden

availhPH L1.dat bzw. avail L2.dat

Ein zeilenweiser Eintrag wird jede volle Sekunde generiert und dient zur zusammenfassenden Darstellung des Status der Phasenmessungen anhand des ermittelten qc_flag.

Fileformat	time	=	Zeit in Tagessekunden
	qc_flag[isat=0]	=	s.o.
	qc_flag[isat=1]	=	s.o.
	...		
	qc_flag[isat=63]	=	s.o.

availRINEXtotal.dat

Diese Datei enthält die pro Satellit ermittelte Gesamtklassifikation eingehender Messwerte und besteht generell aus 9 Zeilen.

Fileformat	1	time; dann Anzahl Messwerte pro Satellit
	2	time; dann Anzahl von L1 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=0 pro Satellit
	3	time; dann Anzahl von L2 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=0 pro Satellit
	4	time; dann Anzahl von L1 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=1 pro Satellit
	5	time; dann Anzahl von L2 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=1 pro Satellit
	6	time; dann Anzahl von L1 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=2 pro Satellit
	7	time; dann Anzahl von L2 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=2 pro Satellit
	8	time; dann Anzahl von L1 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=3 pro Satellit
	9	time; dann Anzahl von L2 Trägerphasenmesswerten mit qcFlag=3 pro Satellit

9.2 AMP-Prozessor

Der AMP-Prozessor wurde (bedingt durch das Fehlen von Amplitudenwerten) nur zum Extrahieren des SNR- und Range-Messwerte aus dem RINEX-File verwendet. Pro Satellit entsteht ein File mit dem Namen

SNR [PRN].dat

Filename:	PHN	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
-----------	-----	---	--

Die Einträge erfolgen zeilenweise pro Messpunkt.

Fileformat	time	=	Zeit in Tagessekunden
	isat	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
	S0	=	SNR S0 in dB-Hz
	CArange	=	Range von L1-Inphasekomponente
	S1	=	SNR S1 in dB-Hz
	P1range	=	Range von L1-Quadraturkomponente
	S2	=	SNR S1 in dB-Hz

P2range	=	Range von L2-Signal
---------	---	---------------------

9.3 CSD-Analysator

Eigentliche Aufgabe des CSD-Analysators ist die Erstellung von Histogrammen einer Größe oder von Wertebereichsangaben aus 2D-Histogrammen zweier Größen. Zum Einsatz kommt dabei das in Kapitel 10 beschriebene Verfahren für 2D-Histogramme, aus dem Mittelwert und Standardabweichung pro Quantil des X-Wertes für den Y-Wert abgeleitet werden. Histogramme einer Größe unterliegen der gleichen Methodik, die dann jedoch eindimensional ausgeführt wird. In der Entwicklungsumgebung, die für die Analyse genutzt wurde, werden hochratig bereitgestellte Rohdatenqualitätsparameter des CSD und des Amplitudenprozessors genutzt. Liegen letztere nicht vor, so entstehen Histogramme mit Nulleinträgen.

Da bei der Messkampagne keine Aufzeichnung von Amplituden erfolgte, wurden ersatzweise die SNR-Werte zur Referenzierung genutzt. Diese sowie die verschiedenen Range-Messungen werden durch einen für ALEGRO erweiterten Prozessor AMPPROC generiert und in Files vom Typ SNR_PRN.dat zwischengespeichert.

Der CSD-Analysator selbst wurde für ALEGRO ebenfalls erweitert, um einerseits STEC-Raten (verrauscht und mit Phasenrauschunterdrückung) und um andererseits Mehrwegefehler (ein- und zweifrequenzprozessiert) mittels Carrier Smoothing zu schätzen.

9.3.1 Konfiguration

Der CSD-Analysator ist so konfiguriert, dass seine Prozessierung automatisch entsprechend der Konfigurationsparameter realisiert wird.

```

/* CONFIGURATION of INPUT-FILES */
/* ===== */

/* CONFIGURATION Input / Output */
/* ===== */
STATION = RTKS
DATE = 2007 01 31
Fpath1 = f:\data\Messkampagne_Rostock\31_01_2007\GRTK\AMP_output\
Fname1 = \ZRES_C_L1[PRN].dat
Fpath2 = f:\data\Messkampagne_Rostock\31_01_2007\GRTK\CSD_output\
Fname2 = \PHN_PRN_FF(HH).dat
Fpath3 = f:\data\Messkampagne_Rostock\31_01_2007\GRTK\AMP_output\
Fname3 = \SNR_PRN.dat
dt = 0.10
Opath1 = f:\data\Messkampagne_Rostock\31_01_2007\Statistic2\
f1 = 1.57542e9 /* GPS L1 Frequency */
f2 = 1.22760e9 /* GPS L2 Frequency */
tu = 0:00 /* start time of analysis */
to = 24:00 /* end time of analysis */
TK = 150. /* Time constant of fpr carrier smoothing */

/* CONFIGURATION of DISTRIBUTION */
/* ===== */
cfgPdBvalue = 35. 75. 0.100
cfgPdBsigma = 0. 5. 0.010
cfgPdBnoise = 0. 5. 0.010
cfgNPdBnoise = 0. 20. 0.010
cfgPHrate = -1000. 1000. 1.000
cfgPHsigma = 0. 50. 0.010
cfgPHnoise = -50. 50. 0.100
cfgSTECrate = -2. 2. 0.010
cfgMultipath = -50. 50. 0.010
cfgSNR = 0. 75. 0.100
cfgRange = 2.e7 3.e7 1.e5

```

```

/* CONFIGURATION of 2D-DISTRIBUTION      */
/* ===== */
Order_PdBvalue_PdBsigma   = 2
Order_PdBvalue_PdBnoise   = 2
Order_PdBvalue_NPdBnoise  = 3
Order_PdBvalue_PHnoise    = 4
Order_PdBnoise_PHnoise    = 5
Order_PHnoise_PHnoise     = 6

/* END CONFIGURATION                  */
/* ===== */

```

Um die Daten des jeweiligen Empfängers verarbeiten zu können, ist die Konfigurationsdatei anzupassen:

- unter CONFIGURATION input/output ist der Pfad und Basisname der Eingangsdaten durch Fpaht1, Fname1, Fpath2 und Fname2 sowie Fpath3 und Fname3 spezifiziert; unter Verwendung des Stationsnamen und des Messdatum wird der automatische Zugriff auf die Ergebnisfiles vom Phasenprozessor und Amplitudenprozessor realisiert.
- unter CONFIGURATION input/output ist die inverse Samplingfrequenz (GBAS, GGEG, GDLR, GNSS: dt=0.05 und beim GRTK dt=0.10 zu setzen
- unter CONFIGURATION input/output ist der Pfad der Ergebnisfiles durch Opath1 spezifiziert; unter Verwendung des Stationsnamen und des Messdatum wird ein Subdirectory zur Ablage der empfängerspezifischen und tagesbezogenen Ergebnisfiles angelegt
- unter CONFIGURATION input/output werden weiterhin noch die GPS-Trägerfrequenzen definiert; eine Erweiterung für GLONASS und GALILEO ist vorgesehen
- unter CONFIGURATION input/output erfolgt weiterhin die Spezifikation der Zeitkonstant TK in Sekunden, die für die Ausführung von Carrier Smoothing Funktionalitäten spezifiziert sein muss
- unter CONFIGURATION of DISTRIBUTION erfolgen die Wertebereichsvorgaben der betrachteten Größen durch Name der Größe, Minimalwert, Maximalwert und Quantifizierungsschrittweite; derzeit behandelbare Größen sind

PdBvalue	=	Leistung der L1-Inphasekomponente in dB
PdBsigma	=	Kurzzeitstandardabweichung von PdBvalue in dB
PdBnoise	=	Geschätzter Momentanwert von PdBvalue in dB
NPdBnoise	=	Geschätzter und normierter Momentanwert von PdBvalue
PHrate	=	L1- bzw. L2-Phasenrate in m/s
PHsigma	=	Kurzzeitstandardabweichung des L1-/L2-Phasenrauschens in mm
PHnoise	=	Geschätzter Momentanwert des L1-/L2-Phasenrauschens in mm
STECrate	=	Rate des Slant TEC in TECU/s
Multipath	=	Geschätzter Momentanwert des Mehrwegefehlers auf Rangemessungen
SNR	=	Signal-Rausch-Abstand
Range	=	Rangemessung in m

- unter CONFIGURATION of 2D-DISTRIBUTION werden Polynomparameter angegeben, die zur Wertebereichsbeschreibung einer Größe Y in Abhängigkeit von einer Größe X

basierend auf den 2D-Histogrammen dienen; diese Option ist in der verwendeten SW-Version noch nicht implementiert.

9.3.2 Eingangsdaten des CSD-Analysators

Als Eingangsdaten wurden hochrätig bereitgestellte Ergebnisse der Rohdaten-Preprozessoren genutzt.

Beim CSD sind das Dateien vom Typ:

PHN PRN F(HH).dat

Filename:	PHN	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
	F	=	Identifikationsnummer der Trägerfrequenz (0: GPS L1 oder GLONASS im oberen L-Band, 1: GPS L2 oder GLONASS im unteren L-Band)
	HH	=	bei Datenraten über 1 Hz zur Identifikation der Stunde (00...23), sonst unverändert HH

Durch den Amplitudenprozessor bereitgestellte Datenfiles sind vom Typ:

ZRES C L1[PRN].dat

Filename:	PHN	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
-----------	-----	---	--

SNR [PRN].dat

Filename:	PHN	=	Identifikationsnummer für Satellit (GPS: 0...31; GLONASS: 32...63)
-----------	-----	---	--

Durch die Konfigurationsdatei ist zwingend vorgeschrieben, wo sich die Files befinden müssen. Der CSD-Analysator organisiert sich den Filezugriff aus den Angaben Fpath1, Fname1, Fpath2, Fname 2, Fpath3, Fname3 sowie dem Stationsnamen und dem Messdatum. Sind keine Files vorhanden (u.U. durch fehlerhafte Konfigurationsangaben), so werden Ergebnisse mit Nulleinträgen erzeugt.

Bei der 1. ALEGRO-Messkampagne erfolgte keine Aufzeichnung von Amplitudenwerten. Damit besitzen Histogramme und Wertebereichsangaben mit Leistungsbezug Nulleinträge.

9.3.3 Ausgangsdaten des CSD-Analysators

Alle Ausgangsdaten werden in spezifischen Dateien unter einem gemeinsamen Pfad abgelegt. Für unsere Konfigurationsdatei²⁴ würde dieser lauten:

f:\data\Messkampagne_Rostock\02_02_2007\Statistic\

Aus den Einträgen Opath1, STATION und DATE wird ein Subdirectory generiert, der den Empfänger- und Datumsbezug der Ergebnisse gewährleistet. 1D-Histogramme werden nur generiert, wenn entsprechende Daten vorlagen.

1D-Histogramme sind in folgenden Dateien enthalten:

²⁴ Die gesamte Datenarchivierung (Rohdaten, Ergebnisse) ist in der TN [Ref 1] beschrieben. Hier und im Folgenden werden Pfade nur in Bezug zu den Beispielen von Konfigurationsdateien benannt.

L1noise.dat	=	Momentanwert des L1 Phasenrauschens in mm
L2noise.dat	=	Momentanwert des L2 Phasenrauschens in mm
L1sigma.dat	=	Kurzzeitstandardabweichung des L1 Phasenrauschens in mm
CAmulti.dat	=	Mehrwegefehler der C/A-Rangemessung im m (Einfrequenzprozessierung) in m
P1multi.dat	=	Mehrwegefehler der P1-Rangemessung im m (Einfrequenzprozessierung) in m
P2multi.dat	=	Mehrwegefehler der P2-Rangemessung im m (Einfrequenzprozessierung) in m
cPmulti.dat	=	Mehrwegefehler der ionosphärenkorrigierten Rangemessung (Zweifrequenzprozessierung) in m
nSTECrate.dat	=	Slant TEC Rate aus verrauschten L1/L2-Phasenmessungen in TECU/s
cSTECrate.dat	=	Slant TEC Rate aus verrauschten L1/L2-Phasenmessungen in TECU/s, jedoch mit angewendeter Rauschunterdrückung
SNR0.dat	=	SNR in dB-Hz aus S0
SNR1.dat	=	SNR in dB-Hz aus S1
SNR2.dat	=	SNR in dB-Hz aus S1

Alle 1D-Histogramme unterliegen einer einheitlichen Datenformatsgestaltung mit einer Matrixstruktur bestehend aus IZ Zeilen und IS Spalten.

Tab. 9-1 Musterformat für 1D-Histogramme

	1	2	3			...	...				IS-3	IS-4	IS-3	IS-2	IS-1	IS
1	ALL	-5	-4.9			-0.1	0	+0.1			4.9	5	0	0	0	0
2	ALL															
3	1															
4	3															
5	7															
...																
IZ-1	28															
IZ	29															

Die erste Spalte dient zu Informationszwecken und gibt an, ob die in der Zeile folgenden Daten stationsbezogen (=ALL) oder satellitenbezogen (=PRN) sind.

Die erste Zeile dient ebenfalls zu Informationszwecken und gibt an die Quantile der Größe wieder, für die das Histogramm abgeleitet wurde, wobei die Werte dem in der Konfigurationsdatei definierten Wertebereich folgen. In dieser Zeile sind die letzten 4 Spalten auf 0 gesetzt.

Die zweite Zeile enthält das stationsbezogene Histogramm in den Spalten 2 bis IS-4.

Die folgenden Zeilen enthalten satellitenspezifische Histogramme in den Spalten 2 bis IS-4, wobei jede Zeile für das Ergebnis eines Satelliten stehen. Damit gilt:

$isat = [iz, 1] \rightarrow$ Wahrscheinlichkeit für $[0][is]$ steht in $[iz, is]$.

In unserer Matrix-Darstellung enthält folglich das rote umrandete Feld die Wahrscheinlichkeit, die für Satellit 7 für einen X-Quantil von -0.1 ermittelt wurde.

Die letzten 4 Spalten enthalten Zusatzinformationen (wenn $iz > 1$) mit folgender Zuordnung

Zeile	Spalte	Bedeutung
1	IS-3	Genutzte Messwerte für Stationshistogramm
iz	IS-3	Genutzte Messwerte für satellitenspezifisches Histogramm
1	IS-2	Nicht genutzte Messwerte für Stationshistogramm, da Wert außerhalb des spezifizierten Wertebereiches
iz	IS-2	Nicht genutzte Messwerte für Satellitenhistogramm, da Wert außerhalb des spezifizierten Wertebereiches
1	IS-1	Stationsbezogener Mittelwert
iz	IS-1	Satellitenbezogener Mittelwert
1	IS	Stationsbezogene Standardabweichung
iz	IS	Satellitenbezogene Standardabweichung

Wertebereichsangaben sind bei der ALEGRO-Messkampagne in folgenden Files enthalten:

CAmulti_L1noise.dat	=	L1 Phasenrauschen in Abhängigkeit vom Mehrwegefehler auf der C/A-Rangemessung (Einfrequenz)
P1multi_L1noise.dat	=	L1 Phasenrauschen in Abhängigkeit vom Mehrwegefehler auf der P1-Rangemessung (Einfrequenz)
P2multi_L1noise.dat	=	L1 Phasenrauschen in Abhängigkeit vom Mehrwegefehler auf der P2-Rangemessung (Einfrequenz)
cPmulti_L1noise.dat	=	L1 Phasenrauschen in Abhängigkeit vom Mehrwegefehler auf der P1-Rangemessung (Zweifrequenz)
cPmulti_L2noise.dat	=	L2 Phasenrauschen in Abhängigkeit vom Mehrwegefehler auf der P2-Rangemessung (Zweifrequenz)
dSTEC_L1noise.dat	=	L1 Phasenrauschen in Abhängigkeit von der STEC-Rate (rauschkorrigierte)
L1noise_L2noise.dat	=	L2 Phasenrauschen in Abhängigkeit vom L1 Phasenrauschen
SNR0_L1noise.dat	=	L1-Phasenrauschen in Abhängigkeit vom SNR S0
SNR1_L1noise.dat	=	L1-Phasenrauschen in Abhängigkeit vom SNR S1
SNR2_L2noise.dat	=	L2-Phasenrauschen in Abhängigkeit vom SNR S2
Range_SNR0.dat	=	SNR0 in Abhängigkeit von C/A-Rangemessung
Range_SNR1.dat	=	SNR1 in Abhängigkeit von P1-Rangemessung
Range_SNR2.dat	=	SNR2 in Abhängigkeit von P2-rangemessung
SNR0_CAmulti.dat	=	Multipath auf C/A-Rangemessung in Abhängigkeit vom SNR S0
SNR1_cPmulti.dat	=	Multipath auf ionosphärenkorrigierter Rangemessung in Abhängigkeit vom SNR S1

SNR2_cPmulti.dat	=	Multipath auf ionosphärenkorrigierter Rangemessung in Abhängigkeit vom SNR S2
------------------	---	---

Alle Wertebereichsvorgaben unterliegen einer einheitlichen Datenformatsgestaltung mit einer Matrixstruktur bestehend aus IZ Zeilen und IS Spalten.

Tab. 9-2 Musterformat für Wertebereichsangaben

	1	2	3			...	...			IS-2	IS-1	IS
1	ALL	-5	-4.9			-0.1	0	+0.1		4.9	5	0
2	ALL											
3	ALL											
4	ALL											
5	7											
6	7											
7	7											
...												
17	21											
18	21											
19	21											
IZ-2	29											
IZ-1	29											
IZ	29											

Die erste Spalte dient zu Informationszwecken und gibt an, ob die in der Zeile folgenden Daten stationsbezogen (=ALL) oder satellitenbezogen (=PRN) sind.

Die erste Zeile dient ebenfalls zu Informationszwecken und gibt an die Quantile der Größe X wieder, in dessen Abhängigkeit der Wertebereich der Größe Y bestimmt werden soll. Die Quantile der Größe X folgen dem in der Konfigurationsdatei definierten Wertebereich und der Quantifizierungsvorgabe. In dieser Zeile ist die letzte Spalte auf 0 gesetzt.

Stationsergebnisse oder satellitenspezifische Ergebnisse sind in jeweils 3 aufeinander folgenden Zeilen enthalten. In Zeile 2 sind die Messwertanzahl pro X-Quantil von der stationsbezogenen Analyse angegeben. In Zeile 3 die zugeordneten Mittelwerte der Größe Y und in Zeile 4 ihre Standardabweichung.

Die folgenden Zeilen, immer gruppiert in 3 aufeinander folgenden Zeilen, enthalten die satellitenspezifischen Ergebnisse.

In unserer Matrix-Darstellung enthalten folglich die 3 rot umrandeten Felder die Messwertanzahl, den Mittelwert und die Standardabweichung der Größe Y für das X-Quantil von -0.1 für Satellit 21.

Die letzte Spalte enthält Zusatzinformationen (wenn iz>1) mit folgender Zuordnung

Zeile	Spalte	Bedeutung
2	IS	genutzte Messwerte Y für stationsbezogene Wertebereichs-

		abhängigkeit
3	IS	nicht genutzte Messwerte Y für stationsbezogene Wertebereichsabhängigkeit, da Y oder X außerhalb Wertebereichsvorgabe
4	IS	Anzahl von Häufigkeitsfeldeinträgen bei der Stationsanalyse, für die die Datenbasis nicht zur Berechnung einer Standardabweichung ausreichte
3i-1	IS	genutzte Messwerte Y für satellitenbezogene Wertebereichsabhängigkeit
3i	IS-1	nicht genutzte Messwerte Y für satellitenbezogene Wertebereichsabhängigkeit, da Y oder X außerhalb Wertebereichsvorgabe
3i+1	IS	Anzahl von Häufigkeitsfeldeinträgen bei der Satellitenanalyse, für die die Datenbasis nicht zur Berechnung einer Standardabweichung ausreichte

10 Anlage B: Nominalverhalten zwischen 2 Messgrößen

Die Methodik wird anhand des Beispiels erläutert, dass die Standardabweichung des SNR pro Minute in Abhängigkeit vom Mittelwert des SNR pro Minute bestimmt werden soll.

Für jede Minute werden pro getrackten Satellit sein SNR-Mittelwert und seine SNR-Standardabweichung bestimmt. Jedes Wertepaar

$$mean[SNR]; stdev[SNR]$$

dient dazu, ein vorab angelegtes und auf 0 gesetztes zweidimensionales Häufigkeitsfeld

$$h_{i,j} = 0 \quad i = 0 \dots I \quad j = 0 \dots J$$

aufzudatieren.

Der Wertebereich des SNR S1 ist mit {0 dB-Hz; 75 dB-Hz} und der der Standardabweichung des SNR mit {0 dB-Hz; 10 dB-Hz} spezifiziert. Beide Messwerte werden mit einer Quantifizierungsgenauigkeit von 0.1 dB-Hz erfasst.

Daraus ergeben sich die Dimensionen des Häufigkeitsfelds h als

$$I = 750$$

$$J = 100$$

Für ein eingehendes Wertepaar, gekennzeichnet durch seine Identifikationsnummer n,

$$mean[SNR_n]; stdev[SNR_n]$$

wird das Häufigkeitsfeld mit den Indices

$$i = round\left(\frac{mean[SNR_n]}{0.1}\right)$$

$$j = round\left(\frac{stdev[SNR_n]}{0.1}\right)$$

um 1 erhöht. Nach Analyse aller Messwerte (stations- oder satellitenbezogen) ist es möglich, den Erwartungswert der Standardabweichung des SNR als Funktion des SNR wie folgt zu bestimmen

$$E(\text{stev}[SNR])_{SNR=i \cdot 0.1} = \frac{\sum_{j=0}^J (j \cdot dy \cdot h_{i,j})}{\sum_{j=0}^J h_{i,j}},$$

wobei dy die Quantifizierungsschrittweite der SNR-Werte beschreibt.

Die Standardabweichung des Erwartungswertes ergibt sich dann als

$$\text{stdev}(\text{stev}[SNR])_{SNR=i \cdot 0.1} = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^J (j \cdot dy - E(\text{stev}[SNR])_{SNR=i \cdot 0.1})^2 \cdot h_{i,j}}{\sum_{j=0}^J h_{i,j}}}.$$

In Abhängigkeit der angenommenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann dann der Wertebereich definiert werden. Bei einem Gauß-verteilten Rauschprozess wird erwartet, dass alle Messwerte im Bereich liegen

$$E(\text{stev}[SNR])_{SNR=i \cdot 0.1} - 4 \cdot \text{stdev}(\text{stev}[SNR])_{SNR=i \cdot 0.1} \dots E(\text{stev}[SNR])_{SNR=i \cdot 0.1} + 4 \cdot \text{stdev}(\text{stev}[SNR])_{SNR=i \cdot 0.1}.$$

Andere Verteilungsfunktionen führen zu veränderten Bildungsvorschriften für den Wertebereich.

11 Anlage C: Algorithmen des „Carrier Smoothing“-Verfahrens

Für die Durchführung des „Carrier Smoothing“ gilt folgender Ansatz

$$S_n = \frac{\rho_n + (TK - 1) \cdot (S_{n-1} + \varphi_n - \varphi_{n-1})}{TK}$$

mit

- φ_n als weniger verrauschte oder mit Mehrwegeeffekten behaftete Größe z.B. Range
- ρ_n als verrauschte oder mit Mehrwegeeffekten behaftete Größe, z.B. Phase
- S_n als geglättete Größe
- TK als die dafür genutzte Zeitkonstante (Konfigurationsparameter).

Generell gilt, dass dieser Algorithmus fehlerfrei anwendbar ist, wenn beide Messgrößen für jede Epoche verfügbar sind und die Phasenwerte als weniger gestörte Größe φ_n frei von Cycle Slips sind. Darüber hinaus ist Stetigkeit der Range- und Phasenmessungen im Idealfall durch Vorprozessierung zu sichern. Damit ist gemeint, dass z.B. Sprünge von 1 ms, die beim Rücksetzen der Empfängeruhr in beiden Rohdaten auftreten, bereits kompensiert sind. Für die Implementierung ist es wichtig, eine geeignete Steuerung zu spezifizieren, die die möglichen Zustandskombinationen der eingehenden Daten der aktuellen und der vorhergehenden Epoche in Bezug auf den Neustart oder die Fortsetzung des Glättungsverfahrens setzt.

11.1 Implementierung des trägerautonomen „Carrier Smoothing“

Eingangsgrößen für ein „Carrier Smoothing“-Verfahren im Einfrequenzfall sind Phasen- und Rangewerte, die zeitlich synchronisiert sein müssen ($in_time=1$), um überhaupt eine Prozessierung vornehmen zu können. Die Prozessierung (Neustart, Fortsetzen des Glättungsprozesses) wird durch die Flags der genutzten Beobachtungsgrößen gesteuert. Diese sind folgende:

Tab. 11-1 Spezifikation der Steuergrößen für „Carrier Smoothing“ für die Einfrequenzprozessierung

Eingangsgröße	Statusgröße	Bedeutung	Wertebereich
φ_n	.Lin_time	Kennzeichnet, ob der Messwert von φ_n dem aktuellen Auswertzeitpunkt zugeordnet ist.	=1 ja =0 nein
	L.qc_flag	Kennzeichnet, ob und wie der Messwert von φ_n verwendet werden kann (CSD-Ausgabeflag)	=-2 nicht verfügbar = 0 nicht freigegeben = 1 Cycle Slip = 2 verwendbar = 3 verwendbar, aber Korrektur von Uhrenfehler oder Cycle Slip ausgeführt
ρ_n	P.in_time	Kennzeichnet, ob der Messwert von ρ_n dem aktuellen Auswertzeitpunkt zugeordnet ist.	=1 ja =0 nein
	P.qc_flag	Kennzeichnet, ob und wie der Messwert von ρ_n verwendet werden kann (CSD-Ausgabeflag)	= 0 nicht verwendbar oder verfügbar = 2 verwendbar

Bezüglich den derzeitigen Prozessorimplementierungen und der Emulierung der Echtzeitdatenbereitstellung sind folgende Zustandskombinationen möglich:

Tab. 11-2 Zustandskombinationen der eingehenden Rohdaten für den Glättungsprozess

L.in_time	L.qc_flag / lastLflag	P.in_time	P.qc_flag	Beschreibung
0	-/-	0	-	Es liegen keine aktuellen Daten für die aktuelle Zeitepoche vor. Mögliche Dateninhalte von vorhergehenden oder zukünftigen Epochen werden nicht verarbeitet. Der Ausgabestatus ist Sflag=0 in_time=0
0	-/-	1	-	Es liegen nur Rangemessungen für die aktuelle Zeitepoche vor. Dieser Zustand tritt bei Neuakquisition eines GNSS-Signals aber auch vereinzelt während des Trackens. Der Dateninhalt ist für die Aktualisierung des Glättungsprozesses unbrauchbar (keine Verfügbarkeit von aufeinander-

				<p>der folgenden Phasenwerten).</p> <p>Der Ausgabestatus ist</p> <p>Sflag=0 in_time=0</p>
1	-/-	0	-	<p>Es liegen nur Phasenmessungen für die aktuelle Zeitepoche vor. Dieser Zustand ist formal unmöglich, kann aber beim Zusammenführen unanhängig bewerteter Einzelmessungen entstehen. Der Dateninhalt ist für die Aktualisierung des Glättungsprozesses unbrauchbar (keine Verfügbarkeit von aktuellen Rangemessungen).</p> <p>Der Ausgabestatus ist</p> <p>Sflag=0 in_time=0</p>
1	0/-	1	0	<p>Range- und Phasenmessungen liegen vor. Rangemessungen wurden als nicht verwertbar klassifiziert. Der CSD befindet sich in der Akquisitionsphase, so dass der Phasenwert nicht bzgl. Freiheit von Cycle Slips bewertet wurde.</p> <p>Der Dateninhalt ist für die Aktualisierung des Glättungsprozesses unbrauchbar (keine Verfügbarkeit von brauchbaren Rangemessungen).</p> <p>Der Ausgabestatus ist</p> <p>Sflag=0 in_time=0</p>
1	0/-	1	2	<p>Der CSD befindet sich in der Akquisitionsphase. Range- und Phasenmessungen liegen vor, wobei letztere nicht bzgl. Freiheit von Cycle Slips bewertet wurden.</p> <p>Ein Neustart des Glättungsprozesses ist auszulösen. Der Ausgabestatus ist</p> <p>Sflag=1 in_time=1</p>
1	1/-	1	0	<p>Range- und Phasenmessungen liegen vor. Rangemessungen wurden als nicht verwertbar klassifiziert. Der CSD befindet sich in der Akquisitionsphase, so dass der Phasenwert nicht bzgl. Freiheit von Cycle Slips bewertet wurde.</p> <p>Der Dateninhalt ist für die Aktualisierung des Glättungsprozesses unbrauchbar (keine Verfügbarkeit von brauchbaren Rangemessungen).</p> <p>Der Ausgabestatus ist</p> <p>Sflag=0 in_time=0</p>
1	1/0	1	2	<p>Tritt ein Cycle Slip auf, so sind in Abhängigkeit von der Vorgeschichte 2 unterschiedliche Reaktionen möglich:</p> <p>Fall 1:</p> <p>Der CSD befand sich in der Akquisitionsphase. Dies ist daran erkennbar, dass das Flag des vorhergehenden Phasenwertes 0 ist. Eine</p>

	1/1 oder 1/2			<p>Konsistenz aufeinander folgender Phasenmesswerte ist nicht gegeben. Es wird ein Neustart des Glättungsprozesses vorbereitet.</p> <p>Der Ausgabestatus ist Sflag=-1 in_time=0</p> <p>Fall 2:</p> <p>Das Glättungsverfahren ist bereits initialisiert oder sogar aktualisiert. Da ein vereinzelt Auftreten von Cycle Slips nicht unbedingt einem realen entspricht, werden zugeordnete Messwertpaare ignoriert und notwendige Prozessierungsentscheidungen anhand zukünftiger Messwerte getroffen.</p> <p>Der Ausgabestatus ist damit wieder Sflag=0 in_time=0</p>
1	2/-1 2/1 oder 2/2	1	2	<p>Range- und Phasenmesswerte sind als verfügbar und verwertbar klassifiziert. Zwei Reaktionen sind notwendig:</p> <p>Fall 1:</p> <p>Durch Einschalten des Glättungsprozessors handelt es sich um das erste Messwertpaar. Das ist erkennbar daran, dass das Statusflag des Prozessors Sflag noch auf -1 gesetzt ist. Dann wird dieses Wertepaar zur Initialisierung des Glättungsverfahrens verwendet.</p> <p>Der Ausgabestatus ist Sflag=1 in_time=1</p> <p>Fall 2:</p> <p>Der Glättungsprozess ist bereits aktiv. Das ist erkennbar daran, dass das Statusflag des Prozessors Sflag auf 1 (initialisiert) oder auf 2 (aktualisiert) gesetzt ist. Dann wird dieses Wertepaar zur Aufdatierung des Glättungsprozessors verwendet.</p> <p>Der Ausgabestatus ist Sflag=2 in_time=1</p>
1	3	1	2	<p>Dieser Zustand ist formal mit dem vorhergehenden identisch, lediglich erfolgte eine Korrektur der Uhrenrücksetzoperation in den Rangemessungen.</p> <p>Wenn dieser Sprung noch nicht in den Rangemessungen erfolgte, so sind spätestens jetzt auch die Rangemessungen um diese 1 ms zu korrigieren.</p> <p>Der Ausgabestatus ist Sflag=2 in_time=1</p>

Daraus ergeben sich zusammenfassend folgende Prozessierungsbedingungen:

Eine Aktualisierung bzw. Initialisierung des Glättungsprozesses ist nur dann auszuführen, wenn für die aktuelle Zeitepoche zugeordnete Range- und Phasenmessungen vorliegen und zumindest die Rangemessung als verwendbar klassifiziert wurde. Ist dies nicht der Fall (gelbe Felder), so lautet die Bedingung $L.intime==0 \parallel P.in_time * P.qc_flag==0$. Das kein geglätteter Range und damit keine Schätzung des Mehrwegefehlers vorliegt, wird mit $S.flag=0$ und $in_time=0$ gekennzeichnet, bevor ins aufrufende Programm zurückgekehrt wird.

Der eher seltene Fall, dass ein Cycle Slip in den Phasenmessungen direkt nach der Akquisitionsphase des CSD detektiert wird (rosa Feld) ($L.qc_flag==1 \ \&\& \ lastLflag==0$) erfordert die Vorbereitung eines Neustart des Glättungsprozesses. Dies erfolgt durch Rücksetzen des Statusflags des Glättungsprozessors auf -1, bevor ins aufrufende Programm zurückgekehrt wird. .

Für die verbleibenden Zustände

- ist eine Initialisierung des Glättungsprozesses auszuführen, wenn eine der folgenden Bedingungen (grüne Felder) erfüllt ist:
 - Bedingung 1: $L.qc_flag==0$ (CSD Akquisition/Neuakquisition)
 - Bedingung 2: $lastLflag == -1$ (Erstes Messwertpaar liegt vor)
 - Ausgabestatus: $Sflag=1$ und $in_time=1$
- werden die Messwertpaare ignoriert, wenn bei der Phase ein Cycle Slip detektiert wurde
 - Bedingung: $qc:flag == 1$ (nur für aktiven Glättungsprozess)
 - Ausgabestatus: $Sflag=0$ und $in_time=0$
- erfolgt eine Erst- oder Neubestimmung des geglätteten Ranges,
 - Ausgabestatus: $Sflag=2$ und $in_time=1$

Bei der Validierung des Algorithmus mit den Daten der Messkampagne zeigt sich, dass Uhrenrücksetzoperationen in den Empfängerdaten zu Instabilitäten des Glättungsverfahrens führten. Instabilitäten entstanden:

- wenn der CSD nach einer Uhrenrücksetzoperation in den Phasenwerten noch eine Feinkorrektur ausführt. Dadurch wird das $L.qc_flag$, das auf 3 gesetzt war, erneut mit 1 überschrieben. Eine Uhrenkorrektur ist nicht mehr anhand des $L.qc_flag$ erkennbar. Es ist folglich zu überlegen, ob jeder Phasenzustand am Ausgang des CSD seine eigene Flagbelegung beim CSD erhalten sollte.
- Bisher wurden die Range-Werte direkt für das Glättungsverfahren genutzt. Aber auch sie sind von den Uhrenrücksetzoperationen betroffen, so dass der Glättungsalgorithmus intern eine Rangekorrektur durchführen muss. Diese wird ausgeführt, wenn das $L.qc_flag$ der Phase 3 ist oder wenn die Differenz zwischen geglätteten Rangewert und eingehenden Rangewert nahe 1 ms liegt. Wenn ein solcher Sprung detektiert wurde, jedoch das Phasenflag $L.qc_flag$ auf 2 steht, ist dies ein Indiz dafür, dass dieser Sprung effektiv eine Epoche vorher auftrat, jedoch eine Feinkorrektur der Phase zusätzlich erfolgte. Diese Zustände werden abgefangen, wenn in solchen Fällen die Phase intern nachkorrigiert wird.

Der Aufruf der „Carrier Smoothing“-Funktion führt nicht dazu, dass eingehende Range- oder Phasenmesswerte im Fall von Uhrenrücksetzoperationen korrigiert werden. Lediglich werden

ihre Zustandsflags auf 3 gesetzt. Ausgabewerte des einfrequenzbasierten „Carrier Smoothing“-Verfahrens sind:

Tab. 11-3 Ausgabewerte für „Carrier Smoothing“ für die Einfrequenzprozessierung

Ausgangsgröße	Maßeinheit	Bedeutung	Wertebereich
SmoothedR	m	Gibt den Wert der geglätteten Rangemessung aus., wenn der Glättungsprozess aktiv ist (Sflag=2)	Siehe geometrischer Range
Sflag	-	Kennzeichnet den Status des Glättungsprozesses	=-1 bisher keine Daten, daher auch keine Initialisierung = 0 Initialisierung = 2 Glättungsprozess läuft
in_time	-	Kennzeichnet, ob für die aktuelle Epoche eine Aktualisierung der Ergebnisse erfolgte, wenn 0 sind Ausgangsdaten nicht zu verwenden	= 0 nein = 2 ja
Rmulti	m	Geschätzter Mehrwegefehler als Differenz zwischen Rangemessung und geglätteter Rangemessung	Sollte im Bereich ± 100 m liegen.
Rclock	m	Akkumulierte Korrekturwerte zur Kompensation der Uhrenrücksetzoperationen an der Rangemessung	Vielfaches des Produkts aus 1 ms und der Lichtgeschwindigkeit
Lclock	m	Akkumulierte Korrekturwerte zur Kompensation der Uhrenrücksetzoperationen an der Phasenmessung	Vielfaches des Produkts aus 1 ms und der Lichtgeschwindigkeit
time	s	Angabe des Zeitpunkts (Tagessekunden), bei dem zuletzt eine Aktualisierung der Ausgabewerte erfolgte	

Dieser Algorithmus ist durch die Funktion getMULTIPATHsingle () realisiert.

11.2 Implementierung des zweifrequenzbasierten „Carrier Smoothing“

Ein kritischer Punkt beim einfrequenzbasierten „Carrier Smoothing“-Verfahren ist der aus dem ionosphärischen Laufzeitterm kommende Fehler, der einen driftenden Biasterm in der geglätteten Rangemessung zur Folge haben kann. Folglich ist es auch möglich, anstatt der Range- und Phasenmessung eines Trägersignals die Messwerte des L1- und L2-Signals gemeinsam zu verwenden.

Die Schätzung des ionosphärischen Laufzeitfehlers aus den Rangemessungen lautet

$$rTEC_n = \frac{PI_n - P2_n}{40.3 \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 \cdot f_1^2}} = TEC_n + \frac{mI_n - m2_n}{40.3 \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 \cdot f_1^2}}$$

und damit ergeben sich identische, ionosphärenkorrigierte Rangemessungen aus den Rangemessungen als

$$cPI_n = PI_n - 40.3 \frac{rTEC_n}{f_1^2} = A_n - \frac{mI_n f_1^2 + m2_n f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}$$

bzw.

$$cP2_n = P2_n - 40.3 \frac{rTEC_n}{f_2^2} = A_n - \frac{mI_n f_1^2 + m2_n f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}$$

Die Schätzung des unkalibrierten Laufzeitfehlers aus den Phasenmessungen lautet

$$pTEC_n = \frac{LI_n - L2_n}{-40.3 \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 \cdot f_1^2}} = TEC_n + \frac{\lambda_1 N I_n - \lambda_2 N 2_n}{40.3 \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 \cdot f_1^2}}$$

und damit ergeben sich identische, ionosphärenkorrigierte Phasenmessungen aus den Phasenmessungen als

$$cLI_n = LI_n + 40.3 \frac{pTEC_n}{f_1^2} = A_n + \frac{\lambda_1 N I f_1^2 - \lambda_2 N 2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}$$

bzw.

$$cL2_n = L2_n + 40.3 \frac{pTEC_n}{f_2^2} = A_n + \frac{\lambda_1 N I f_1^2 - \lambda_2 N 2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}$$

Die Größe $cP=cP1=cP2$ fungiert jetzt als die zu glättende Größe, wobei $cL=cL1=cL2$ als die dazu kompatible rauscharme Größe verwendet wird.

Die Steuerung des Glättungsverfahrens kann alternativ durch die Zustandsflags der Berechneten STEC-Ergebnisse oder die Zustandsflags der notwendigen Rohdaten erfolgen.

Für die Berechnung des STEC aus den Rangemessungen gilt:

Tab. 11-4 Zustandskombinationen bei der Generierung der STEC aus Ranges

P1.in_time	P1.qc_flag	P2.in_time	P2.qc_flag	Beschreibung
0	-	0	-	Es kann kein TEC aus Rangemessungen berechnet werden, da Daten nicht gültig für die aktuelle Zeit.
1	0 2 0	1	0 0 2	Es kann kein TEC aus Rangemessungen berechnet werden, da beide oder einer der Rangemesswerte nicht plausibel.

1	2	1	2	TEC aus Rangemessungen wurde berechnet.
---	---	---	---	---

Für die Berechnung des STEC aus Phasenmessungen gilt:

Tab. 11-5 Zustandskombinationen bei der Generierung der STEC aus Phasen

L1.in_time	L1.qc_flag	L2.in_time	L2.qc_flag	Beschreibung
0	-	0	-	Es kann kein TEC aus Phasenmessungen berechnet werden, da die Daten nicht für die aktuelle Zeitepoche gelten.
1	0 0 0 2 3	1	0 2 3 0 0	Es kann ein TEC aus Phasenmessungen berechnet werden, wobei die Qualität beider oder eines der genutzten Phasenwerte nicht bewertet wurde. Da einer der trägerspezifischen CSD's in der Neuakquisition ist, ist mit veränderten Mehrdeutigkeiten zu rechnen. Eine Neuinitialisierung des Glättungsprozesses ist vorzubereiten.
1	0 1	1	1 0	Eine TEC-Berechnung aus den Phasenmessungen ist nicht möglich, weil ein Phasenwert Cycle Slip behaftet ist. Eine Neuinitialisierung ist vorzubereiten.
1	1 1 1 2 3	1	1 2 3 1 1	Ein er oder beide Phasenwerte wurden als Cycle Slip behaftet klassifiziert. Das Wertepaar wird ignoriert. Die Entscheidung, ob ein Neustart oder ein Fortsetzen des Glättungsverfahrens möglich ist. Wird anhand zukünftiger Messwerte durchgeführt.
1	2 3	1	2 3	Beide Phasenwerte wurden als verwertbar klassifiziert, auch wenn eine Korrektur der Uhrenrücksetzoperation erfolgte. Die Messwerte werden zum Update des Glättungsprozesses verwendet.
1	2 3	1	3 2	Dies ist ein unerlaubter Zustand, weil Uhrenrücksetzoperationen alle Rohdaten gleichzeitig betreffen. Dieser Zustand wird jedoch nicht durch die Funktion detektiert.

Daraus ergeben sich zusammenfassend folgende Prozessierungsbedingungen:

Eine Aktualisierung bzw. Initialisierung des Glättungsprozesses ist nur dann auszuführen, wenn für die aktuelle Zeitepoche zugeordnete Range- und Phasenmessungen vorliegen. Die zugeordnete Bedingung lautet

$P1.in_time == 0 \parallel P2.in_time == 0 \parallel L1.in_time == 0 \parallel L2.in_time == 0$.

Diese Bedingung kann gelöscht werden, wenn der Funktionsaufruf nur erfolgt, wenn aktuelle Messwerte vorliegen.

Eine Neuinitialisierung oder Fortführung des Glättungsverfahrens erfordert mindestens das Vorliegen verwendbarer Rangemessungen P1 und P2. Ist dies nicht der Fall,

$P1.qc_flag \neq 2 \parallel P2.qc_flag \neq 2$

so werden auch diese Messwerte nicht verarbeitet. Dass kein Glättungsergebnis vorliegt, wird durch die Prozessierungsflags $S.in_time=0$ und $S.flag=0$ gekennzeichnet, bevor ins aufrufende Programm zurückgekehrt wird.

Ist einer der Phasenmesswerte als Cycle Slip behaftet klassifiziert und tritt dieser Zustand direkt nach der Neuakquisition eines oder beider Phasenmesswerte (CSD) auf, so liegt ein unbestimmter Zustand vor. Die Bedingung dafür lautet

$(L1.qc_flag == 1 \parallel L2.qc_flag == 1) \&\& lastLflag == 0$

Es wird eine Neuakquisition durch Setzen des Prozessorzustandsflag auf -1 vorbereitet.

Für die verbleibenden Zustände gilt:

- Es ist eine Initialisierung des Glättungsprozesses auszuführen, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

Bedingung 1: $L1.qc_flag == 0 \parallel L2.qc_flag == 0$ (CSD Akquisition/Neuakquisition)

Bedingung 2: $lastLflag == -1$ (Erstes Messwertpaar liegt vor)

Ausgabestatus: $Sflag=1$ und $in_time=1$

- Die Messwertpaare werden ignoriert, wenn bei der Phase ein Cycle Slip detektiert wurde, jedoch der Glättungsprozess bereits aktiv ist.

Bedingung : $L1flag == 1 \parallel L2flag == 1$ (nur für aktiven Glättungsprozess)

Ausgabestatus: $Sflag=0$ und $in_time=0$

- Eine Erst- oder Neubestimmung des geglätteten Ranges erfolgt damit nur noch unter der

Bedingung : $(L1flag == 2 \parallel L1flag == 3) \&\& (L2flag == 2 \parallel L2flag == 3)$

Ausgabestatus: $Sflag=2$ und $in_time=1$

Auch hier ist zu beachten, dass ein Auftreten der Uhrenrücksetzoperation wie im Einfrequenzfall kompensiert werden muss.

Ausgabewerte des einfrequenzbasierten „Carrier Smoothing“-Verfahrens sind:

Tab. 11-6 Ausgabewerte für „Carrier Smoothing“ für die Zweifrequenzprozessierung

Ausgangsgröße	Maßeinheit	Bedeutung	Wertebereich
SmoothedR	m	Gibt den Wert der geglätteten Rangemessung aus, wenn der Glättungsprozess aktiv ist ($Sflag=2$)	Siehe geometrischer Range
Sflag	-	Kennzeichnet den Status des Glättungsprozesses	$= -1$ bisher keine Daten, daher auch keine Initialisierung $= 0$ Initialisierung $= 2$ Glättungsprozess läuft
in_time	-	Kennzeichnet, ob für die aktuelle Epoche eine Aktualisierung der Ergebnisse erfolgte, wenn 0 sind	$= 0$ nein $= 2$ ja

		Ausgangsdaten nicht zu verwenden	
Rmulti	m	Geschätzter Mehrwegefehler als Differenz zwischen Rangemessung und geglätteter Rangemessung	Sollte im Bereich ± 100 m liegen.
Rclock	m	Akkumulierte Korrekturwerte zur Kompensation der Uhrenrücksetzoperationen an der Rangemessung	Vielfaches des Produkts aus 1 ms und der Lichtgeschwindigkeit
Lclock	m	Akkumulierte Korrekturwerte zur Kompensation der Uhrenrücksetzoperationen an der Phasemessung	Vielfaches des Produkts aus 1 ms und der Lichtgeschwindigkeit
time	s	Angabe des Zeitpunkts (Tagessekunden), bei dem zuletzt eine Aktualisierung der Ausgabewerte erfolgte	

Dieser Algorithmus ist durch die Funktion getMULTIPATHdual () realisiert.

12 Anlage D: Mehrwegefehler im räumlichen Bezug

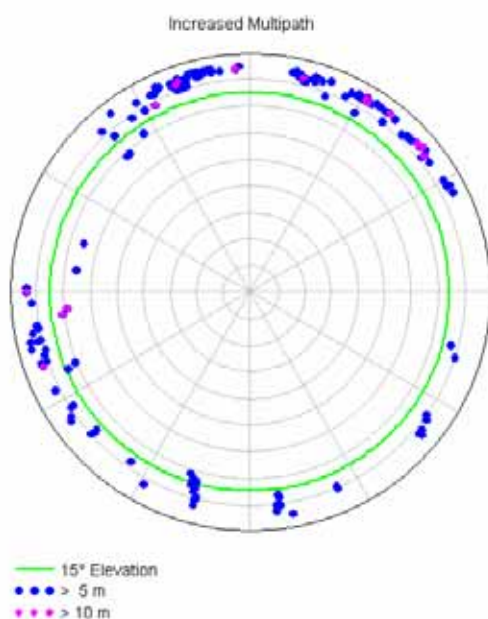
12.1 Referenzstation

Für die Interpretation des Mehrwegefehlers ist es erforderlich, den Standort der Referenzstation während der Messkampagne zu berücksichtigen.



Fig. 12-1 Lage der Referenzstation

Erhöhter Mehrwegefehler (C/A) – Referenzstation 30.01.2007



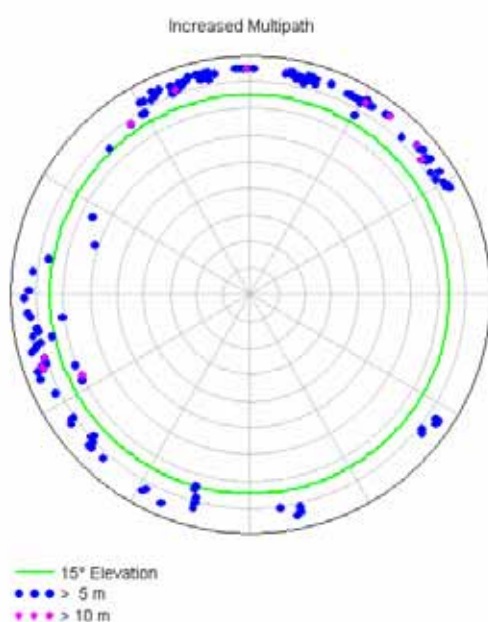
Scandline:

Anlegen	Ablegen	Effekt	
01:15	02:30	01:41h 23s (PRN 09)	- 19/263
		01:41h 38s (PRN 18)	- 21/319
		01:42h 33s (PRN 10)	- 18/198
		01:43h 03s (PRN 09)	- 19/263
		01:46h 34s (PRN 10)	- 16/167
04:15		04:31h 00s (PRN 30)	- 16/247
		04:37h 10s (PRN 30)	- 19/248
	06:00	06:00h 11s (PRN 01)	- 18/326
10:45	11:00	10:44h 19s (PRN 03)	- 24/277
16:45	17:00	17:04h 46s (PRN 23)	- 16/196
22:45	23:45	23:44h 42s (PRN 24)	- 21/265
		23:45h 25s (PRN 26)	- 25/286



Mehrwegefehler der C/A-basierten Rangemessung auf L1, die bei Elevationswinkeln über 15° auftraten, lassen sich überwiegend dem Scandline-Fährverkehr zuordnen (schwarz).

Erhöhter Mehrwegefehler (C/A) – Referenzstation 31.01.2007



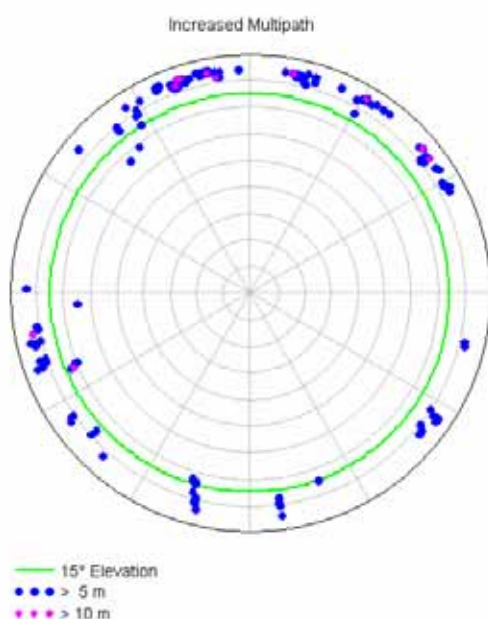
Scandline:

Anlegen	Ablegen	Effekt	
04:15		04:32h 38s (PRN 30)	- 16/247
		04:34h 28s (PRN 30)	- 19/248
8:45	09:00	08:51h 11s (PRN 16)	- 24/296
16:45	17:00	17:00h 36s (PRN 23)	- 15/196
18:45	19:00	19:09h 14s (PRN 17)	- 20/244
		19:11h 50s (PRN 17)	- 19/243
	23:45	23:49h 42s (PRN 24)	- 19/263
		23:49h 11s (PRN 26)	- 29/288

Mehrwegefehler der C/A-basierten Rangemessung auf L1, die bei Elevationswinkeln über 15° auftraten, lassen sich überwiegend dem Scandline-Fährverkehr zuordnen (schwarz).



Erhöhter Mehrwegefehler (C/A) – Referenzstation 01.02.2007



Scandline:

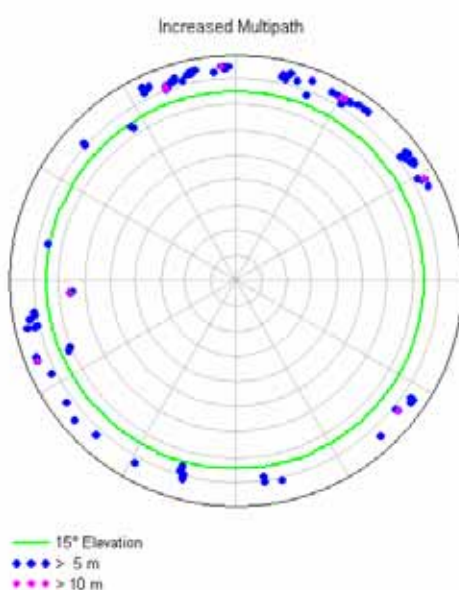
Anlegen	Ablegen	Effekt	
		01:38h 32s (PRN 10)	- 17/197
		01:49h 07s (PRN 09)	- 25/266
02:30		02:32h 46s (PRN22)	- 15/327
04:15		04:23h 10s (PRN14)	- 23/318
		04:25h 12s (PRN30)	- 17/247

		04:30h 54s (PRN30)	- 20/248
	06:00	06:01h 18s (PRN01)	- 21/323
16:45	17:00	16:56h 40s (PRN 23)	- 15/196
		16:58h 02s (PRN 23)	- 16/196
22:45	23:45	22:53h 40s (PRN 28)	- 15/160



Mehrwegefehler der C/A-basierten Rangemessung auf L1, die bei Elevationswinkeln über 15° auftraten, lassen sich überwiegend dem Scandline-Fährverkehr zuordnen (schwarz).

Erhöhter Mehrwegefehler (C/A) – Referenzstation 02.02.2007



Scandline:

Anlegen	Ablegen	Effekt/PRN	Ele/Azi
01:15	02:30	01:42h 42s (PRN 09)	- 25/262
		02:31h 43s (PRN 22)	- 16/326
04:15		04:22h 37s (PRN 30)	- 18/247
		04:24h 52s (PRN 30)	- 19/248
	6:00	05:46h 47s (PRN 01)	- 17/326

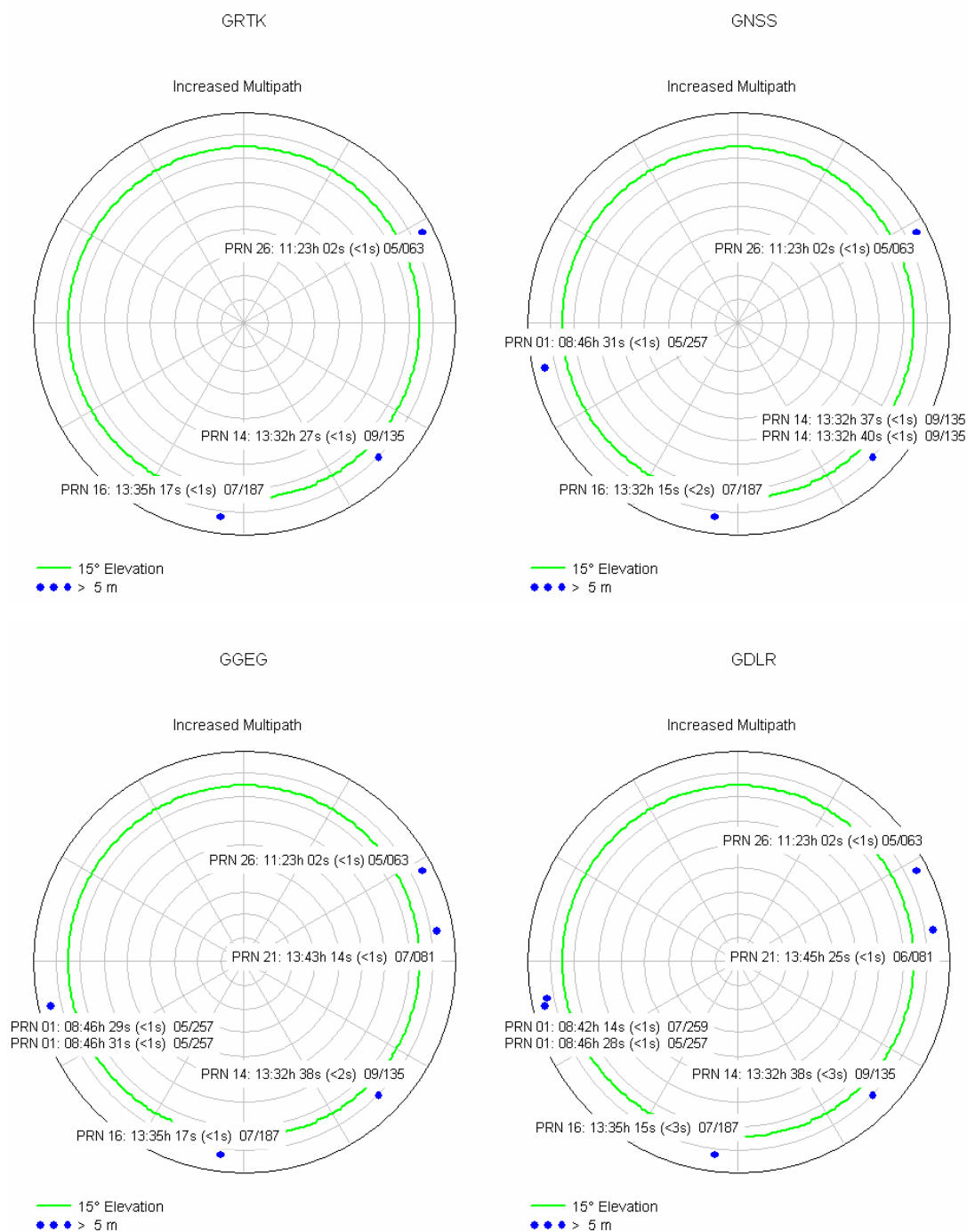


Mehrwegefehler der C/A-basierten Rangemessung auf L1, die bei Elevationswinkeln über 15° auftraten, lassen sich überwiegend dem Scandline-Fährverkehr zuordnen (schwarz).

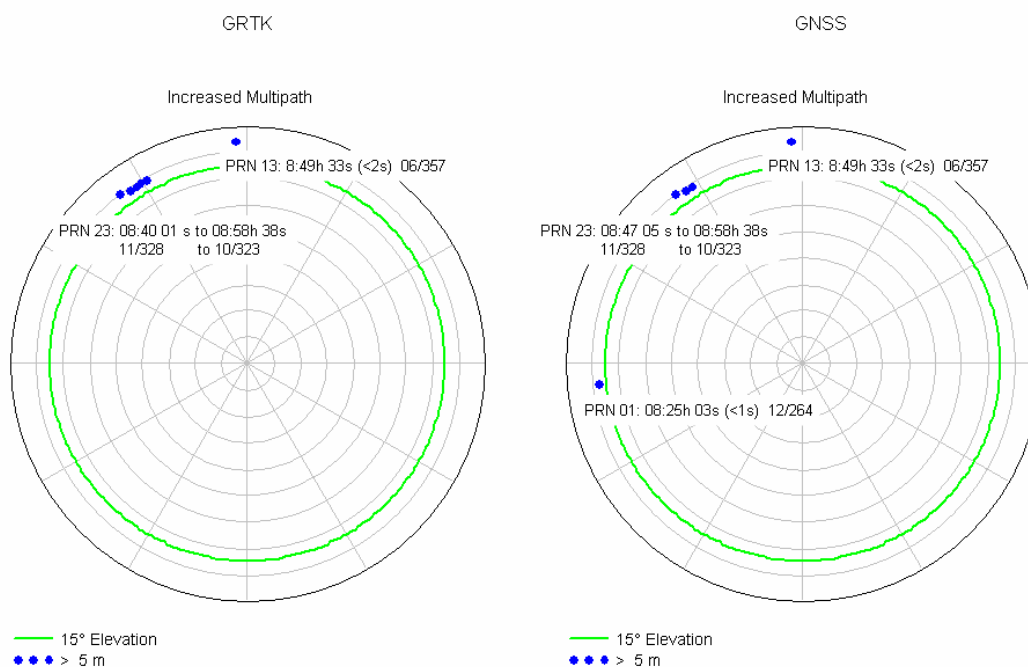
12.2 ROVER

Am 30.01.2007 wurden keine Mehrwegefehler außerhalb vom 5m-Wertebereich bestimmt.

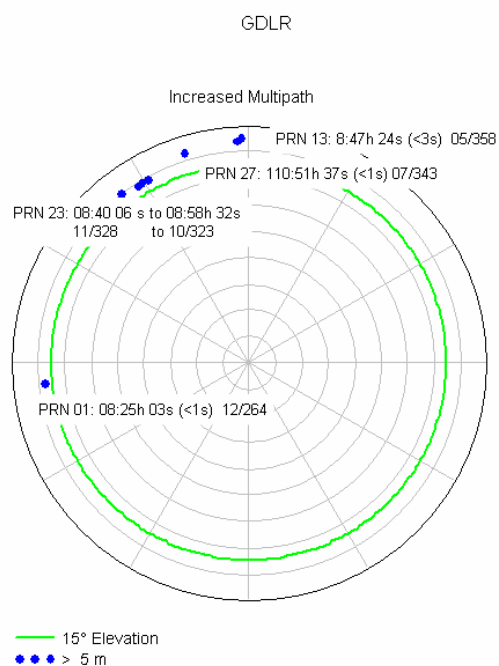
ROVER (31.01.2007) – Teil 1



ROVER (01.02.2007) – Teil 1



ROVER (01.02.2007) – Teil 2



ROVER (02.02.2007) – Teil 1

